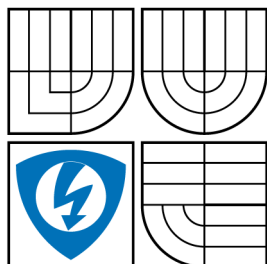


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC
TECHNOLOGY

DYNAMICKÁ ELEKTRONEUROSTIMULACE A ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI KŮŽE

DYNAMIC ELECTRONEUROSTIMULATION AND ELECTRICAL PROPERTIES OF
SKIN

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ING. MAREK ŠPETA

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

ING. JIŘÍ ŠPINKA

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektrotechnická výroba a management

Student: Ing. Marek Špeta

ID: 72179

Ročník: 2

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Dynamická elektroneurostimulace a elektrické vlastnosti kůže

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte problematiku dynamické elektroneurostimulace a náhradních elektrotechnických schémat lidské kůže. Proměřte na konkrétních osobách parametry (event. změny impedance) kůže. Navrhněte a realizujte náhradní elektrický obvod vycházející z provedeného souboru měření. S využitím obvodu vycházejícího z Vašeho návrhu proměřte elektrické signály přístroje DIADENS a měření vyhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 30.5.2013

Vedoucí práce: Ing. Jiří Špinka

Konzultanti diplomové práce:

prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá teoretickým základem dynamické elektroneurostimulace, což je působení elektrického signálu na akupunkturní body na kůži. Touto technikou jsou vybaveny přístroje firmy DiaDENS ruské provenience. Praktická část je věnována návrhu modelu impedance lidské kůže, zejména pak odvození modelu od tříprvkového Cole-Cole modelu. Nedílnou součástí je návrh náhradního obvodu prvku s konstantní fází a jeho zakomponování do obvodu. Tento obvod je následně navrhnout, simulován a vyroben. Výsledný přípravek je použit jako zátěž pro měření charakteristik přístroje DiaDENS.

KLÍČOVÁ SLOVA

elektroneurostimulace, DENS, DiaDENS, impedance, kůže, CPE, prvek s konstantní fází, Cole-Cole

ABSTRACT

The focus of this diploma thesis is on theoretical basics of dynamic electroneurostimulation, which is an effect of electrical signal on acupuncture points of skin. This technology is used in devices made by russian DiaDENS company. Practical part of this thesis covers design of human skin impedance model. Especially derivation from three-element Cole-Cole model. Elementary, there is design of equivalent circuit of constant phase element and its incorporation into circuit. Then this circuit is designed, simulated and produced. Resulting product is used as a load to measure the characteristics of the DiaDENS device.

KEYWORDS

electroneurostimulation, DENS, DiaDENS, impedance, skin, CPE, constant phase element, Cole-Cole

ŠPETA, M. *Dynamická elektroneurostimulace a elektrické vlastnosti kůže*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 65 s.
Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Špínka.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Dynamická elektroneurostimulace a elektrické vlastnosti kůže“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Špinkovi za užitečnou odbornou, metodickou a organizační pomoc a cenné rady při zpracování této práce. Další mé poděkování směřuje k Ing. Petru Dvořákovi a Ing. Martinu Frkovi, Ph.D., díky kterým proběhlo veškeré měření v laboratořích naprosto hladce a bez problémů. V neposlední řadě nemohu opomenout pana emeritního profesora Ing. Juraje Valsu, CSc., který mi byl ochoten osvětlit princip CPE a zaslat zdrojové kódy pro výpočty. Závěrem akademického díkuvzdání bych chtěl poděkovat Ing. Jiřímu Starému, Ph.D. za předání znalostí z oblasti výroby plošných spojů a následnou konzultaci při výrobě přípravku z této diplomové práce.

Děkuji všem svým známým a kamarádům, kteří byly ochotni své tělo propůjčit k laboratorním pokusům. Děkuji svým studijním kolegům, kteří během těch dvou let vytvořili skvělou studijní a přátelskou atmosféru. Své největší a upřímné poděkování však věnuji své rodině, která mne byla ochotna podporovat další dva roky ve studiu.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Úvod	9
1 Elektrické parametry lidské kůže	10
1.1 Kůže	10
1.2 Impedance kůže	11
1.2.1 Změny impedance	11
1.2.2 Měření impedance	12
1.3 Tříprvkové modely impedance kůže	13
1.3.1 Obecné pojednání	13
1.3.2 Základní model	14
1.3.3 Nelineární základní model	14
1.3.4 Cole-Cole model	14
1.3.5 None-Cole model	15
2 Dynamická elektroneurostimulace	16
2.1 Historické kořeny	16
2.2 Podstata metody	17
2.3 Znaky DENS	18
2.3.1 Indikace	19
2.3.2 Kontraindikace	19
2.3.3 Kombinace s dalšími léčebnými postupy	20
3 Realizace metody DENS	21
3.1 DiaDENS zařízení	21
3.2 DiaDENS-PC	23
3.2.1 Funkční režimy	23
3.2.2 Zóny a body působení	25
4 Model náhradního obvodu impedance kůže	26
4.1 Měření impedance kůže	26
4.1.1 Použité elektrody	26
4.1.2 Měřicí přípravek	26
4.1.3 Impedanční spektroskop	27
4.1.4 Příprava kůže	28
4.1.5 Nastavení spektroskopu	28
4.2 Analýza dat pro statický model	29
4.2.1 Korelační analýza	30
4.2.2 Interpretace dat do modelu	31

4.3	Analýza dat pro dynamický model	33
4.3.1	Interpretace dat do modelu	35
4.4	Výpočet náhradního obvodu CPE	38
4.5	Výstup	40
5	Realizace náhradního obvodu	42
5.1	Simulace CPE	42
5.2	Návrh náhradního obvodu	44
5.3	Výroba přípravku	44
5.4	Kontrola měřením	46
6	DiaDENS – realita	49
6.1	Měřicí pracoviště	49
6.2	Naměřené parametry	49
6.2.1	Impulz	49
6.2.2	Frekvence	54
6.2.3	Vliv modelu kůže	55
7	Závěr	57
	Reference	59
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	62
	Seznam příloh	63
A	Graf naměřených impedancí kůže.	64
B	Popis souborů na médiu	65

ÚVOD

Moderní lékařské zařízení a moderní metody diagnostiky se především zaměřují na důsledky zdravotního stavu. Problém nastává, pokud uvažujeme, že z hlediska nepopíratelné kauzality existuje ke každému důsledku jeho příčina. Tyto příčiny klasická medicína zanedbává a řeší spíše důsledky, ať už je to ve formě medikamentní léčby či operativního zákroku.

Na lidské zdraví působí dva elementy. Prvním elementem je vliv okolního životního prostředí. S nástupem pozdně moderní společnosti ve dvacátém století je pro životní prostředí typické znečištění jak těžkým průmyslem napojeným na spalování fosilních paliv, tak na chemický či potravinářský průmysl, při jehož činnosti unikají znečišťující látky do ovzduší. Nemusíme také chodit daleko od svých domovů. Dle průzkumů opět stoupá popularita spalování dřeva a uhlí. Hustá silniční doprava postavená na spalovacích motorech jen vývoj podtrhuje. Automobilky sice vyrábějí stále více ekologičtější vozidla, ale vliv trhu nedovoluje plné rozvinutí ať už hybridních, či plně ekologických motorů.

Druhým elementem je lidská psychika do jisté míry také ovlivněná okolním sociálním prostředím, do kterého spadá i pracovní prostředí. Působení na psychiku je dáno i lidskou povahou, tím jak je člověk vnitřně schopen přijímat vnější vlivy.

Mezi další činitele ovlivňující lidské zdraví patří například špatná životospráva. Vzniká tak uvnitř těla nerovnováha, kterou je zdravý člověk schopen potlačit. Pokud však faktory působí dlouhodobě, může se nerovnováha vyvinout ve zdravotní potíže, které indikují lékařské metody jako důsledek.

Smyslem metody elektrodynamické stimulace, je odhalovat právě zmíněné příčiny a nerovnováhy v lidském těle a léčit je bez použití medikamentů. Jejím základem jsou poznatky jak moderní (elektroneurostimulace), tak tradiční pocházející z Asie, kde se stimulace v různých formách (propichování, podtlak) používá s úspěchem několik tisíciletí.

Tato metoda je založena na účincích elektrického proudu na lidský organismus. Pro vstup proudu se využívají akupresurní či akupunkturní body a zóny na kůži. Stimulují se nervová zakončení, což vyvolá příznivé neurochemické mechanismy. Tato metoda je velmi adaptibilní, jelikož sleduje změny na lidské kůži ve formě změny elektrické impedance a podle toho upravuje vysílané signály. Nemůže proto dojít, jako se tomu stává u léčby medikamenty, k návyku na léčbu a ke snížení jejího účinku.

Stimulace vyvolá řadu pozitivních účinků, jako zmírnění bolesti, zlepšení krevního oběhu, snižuje možnost zánětu, vytvořené aktivní látky také dokáží likvidovat ohniska výskytu patogenních látek a zlepšit náladu člověka.

1 ELEKTRICKÉ PARAMETRY LIDSKÉ KŮŽE

1.1 Kůže

Ke správnému pochopení elektrických vlastností kůže je důležité krátce o tomto největším orgánu lidského těla pojednat.

Obsah plošně rozvinuté kůže se pohybuje okolo $1,6$ až $1,8\text{ m}^2$ a v závislosti na množství podkožního tuku se hmotnost může vyšplhat až na 20 kg . Tloušťka se v závislosti na místě na těle pohybuje od $0,4$ do 4 mm a dělí se na tři základní vrstvy: pokožka, škára a podkoží [18].

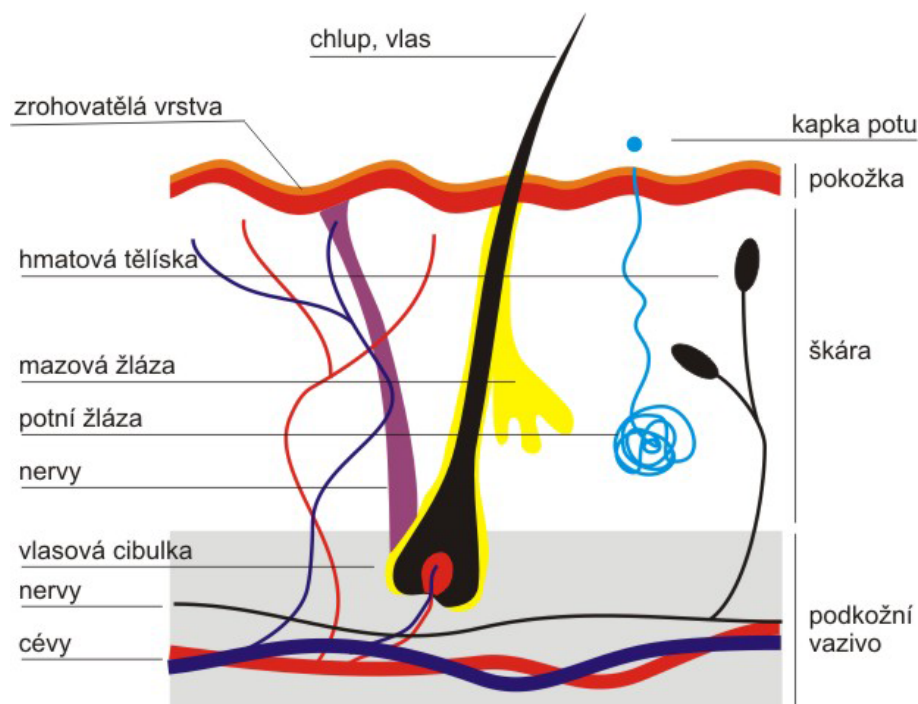
Kůže plní tyto funkce:

- **Ochrana** – před mechanickým poškozením a proti vstupu škodlivin, mikroorganismů a virů do těla.
- **Smyslové vnímání** – prostřednictvím hmatových tělísek.
- **Termoregulace** – udržování stabilní tělesné teploty, prostřednictvím potních žláz regulace zahřátí organismu při výkonu.
- **Skladování živin** – ukládání zejména tuků, vody, minerálů a vitamínů.
- **Vylučování a vstřebávání** – kůže slouží jako membrána pro výstup látek potem a vstup látek rozpustných v tucích.
- **Estetická funkce.**

První vrstvou je tenká povrchová pokožka – epidermis. Je tvořena několika dílčími podvrstvami: svrchní rohová, světlá, zrnitá, ostnitá a bazální. Povrch rohové vrstvy je tvořen odumřelými buňkami, nad nimiž je vytvořen povrchový film potu, mazu a jiných látek. V bazální vrstvě se nachází ochranné prvky těla proti UV záření, pigment a melanin. Dochází zde také k tvoření nových buněk pokožky, které vystupují na povrch a zde odumírají.

Prostřední vrstvou je škára (latinsky dermis). Obsahuje především vazivo, cévy a nervová zakončení. Je základem pružnosti, odolnosti a pevnosti kůže. Vrchní část škáry je různě zvlněna a tvoří tak plastický povrch kůže využívaný například v daktiloskopii [18].

Nejspodnější je vrstva podkoží (subcutis). Je to izolační vrstva tuku a řídkého vaziva chránící organismus proti teplotním vlivům a mechanickému poškození. Jde také o zásobárnu živin, neboť právě zde jsou přebytky uchovávány.



Obrázek 1.1: Stavba kůže [28].

1.2 Impedance kůže

Elektrická impedance kůže charakterizuje její pasivní elektrické vlastnosti, popisuje ji tedy jako spotřebič elektrické energie, byl-li by připojen ke zdroji elektrického napětí. Impedance kůže je individuální parametr každého člověka, závislá na mnoha faktorech, počínaje místem měření, až po teplotu okolí konče.

1.2.1 Změny impedance

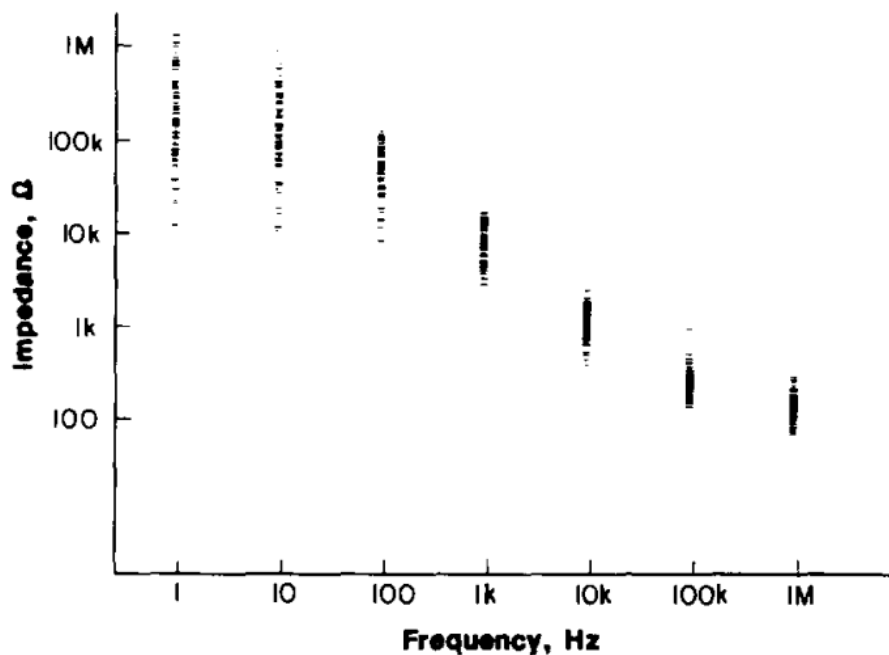
- **Periodické změny** – jsou reflexivně podmíněny dobou příjmu potravy. Křivka má tři vrcholy (ráno, poledne, večer). Impedance se také mění dle ročního období. V letních měsících je daleko menší než v zimních [1].
- **Lokální změny** – až k dvojnásobnému poklesu odporu dochází jak v důsledku fyziologických změn, tak i zvýšením vlhkosti při pocení. Právě tyto lokální změny jsou důvodem použití dynamických metod. Nedoporučuje se tedy měřit v místech s velkým výskytem potních žláz.
- **Kožně-galvanický reflex** – ke snížení impedance nedochází v důsledku fyziologických změn, ale v důsledku podráždění nervové soustavy provázané pocením. Tento efekt se využívá u detektorů lži.

1.2.2 Měření impedance

V roce 1988 tým pod vedením doktora J. Rosella na Barcelonské univerzitě dokázal měřením, že největší rozptyl impedance se vyskytuje na nízkých frekvencích [27]. Experiment byl prováděn na mužích ve věku 19–55 let, hmotnostech 53–105 kg, při teplotě 25 °C a relativní vlhkosti 60–70 %. Předmětem výzkumu bylo deset rozličných částí těla, které nebyly nijak upravovány, jen byl nanesen vodivý gel.

Výsledkem byl statistický graf na obr 1.2. Nízký rozptyl hodnot mezi 100 kHz a 1 MHz značí, že impedance na vysokých frekvencích je téměř stejná na všech místech u všech subjektů. Sériový odpor může být v tříprvkových modelech impedance zafixován okolo hodnoty 120 Ω . Mezi 1 kHz a 100 kHz je větší rozptyl, jež může být modelován kapacitorem 10–40 nF (koresponduje s kapacitou bariérové vrstvy kůže). Vysoký rozptyl nízkých frekvencí je možné modelovat paralelním rezistorem odpovídajícím rezistanci bariérové vrstvy.

Autoři na závěr dodávají, že je důležité u dvouelektrodových systému (což je náš případ) velmi opatrně volit funkční prvky (zejména zesilovač signálů), jelikož jsou náchylné na nízké frekvence [27]. Toto omezení se nevyskytuje u čtyřelektrodových zařízení.



Obrázek 1.2: Výsledky experimentu J. Rosella [27].

1.3 Tříprvkové modely impedance kůže

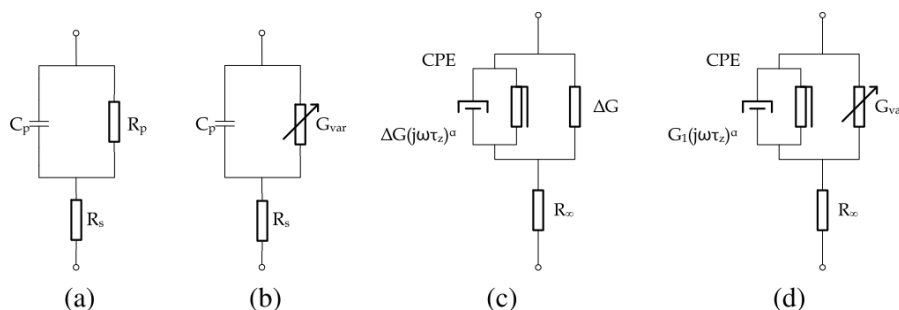
V současnosti se k modelování impedance kůže používají především tříprvkové modely impedance kůže obsahující tři elektronické prvky. Trend současného vývoje však směřuje k poznání nejen fyzikálních vlastností kůže pomocí těchto modelů, ale také poznání biologické a chemické díky víceprvkovým konstelacím. Ku příkladu může být uveden výzkum doktora Ruwansiriho [19].

Na protější misce vah také stojí jedno a dvouprvkové modely, které se ukázaly svým poznáním parametrů kůže jako nedostatečné [2]. Model s čistou rezistancí již ze své podstaty nemůže správně vystihnout kapacitu bariérové vrstvy a model se dvěma prvky (Debeyho model paralelního zapojení kapacitoru a rezistoru), jak ukázalo zmíněné měření J. Rosella, nepopíše jedním odporem dostatečně celé frekvenční rozpětí.

1.3.1 Obecné pojednání

První tříprvkový model impedance byl vyvinut na základě výzkumů profesora Coleho [3] a doktora Barnetta [4]. Na obr. 1.3a tak vidíme paralelně zapojený RC prvek v sérii s rezistorem. Tento model poskytuje uspokojivé výsledky u signálů s nízkou amplitudou. Při vyšších amplitudách se obvod chová nelineárně. Tento model byl modifikován výzkumným týmem pod vedením Dorgana [5]. Na obr. 1.3b byl nahrazen lineární odpor nezávislou konduktancí a standardní kapacitor polarizovanou variantou.

Poté, co byly výsledky Coleovy analýzy impedance kůže zobrazeny v komplexní rovině, bylo zjištěno, že výsledná křivka tvoří část kruhu. Nejlépe tato chování modeluje tzv. prvek s konstantní fází (CPE). Nový Cole-Cole model je zobrazen na obr. 1.3c. Jeho nevýhodou pro některé aplikace je proporční závislost admitance CPE na paralelní konduktanci. Nahrazením lineární paralelní konduktance za nelineární byl tento problém vyřešen Model se nazývá None-Cole (obr. 1.3d) [6].



Obrázek 1.3: Tříprvkové modely impedance kůže.

1.3.2 Základní model

U základního modelu obr. 1.3a lze snadno prostudovat jeho chování. Po zapojení stejnosměrného proudu se kapacitor chová jako rozpojený vodič, model se pak zjednoduší na prostý sériový součet rezistorů R_s a R_p . Naproti tomu při vysoké frekvenci se kapacitor zkratuje, proud poteče cestou nejmenšího odporu a přemostí rezistor R_p .

Jak už bylo v předcházejícím textu zmíněno, kapacitor C a rezistor R_p modelují bariérovou vrstvu kůže. Není to nic jiného než kapacita buněčných membrán, plošných vazivových struktur resp. rezistance tělesných tekutin. Rezistance R_s je z velké části tvořena odporem kůže a z části je ovlivněna vodivostí tělesných tekutin.

Impedanci tohoto modelu vyjádříme jako [20]:

$$\mathbf{Z}(f) = R_s + \frac{R_p}{1 + j2\pi f R_p C}, \quad (1.1)$$

kde $\mathbf{Z}(f) = [\Omega]$ je komplexní impedance, $R_s = [\Omega]$ je odpor kůže, $C = [F]$ je kapacitance bariérové vrstvy, $R_p = [\Omega]$ je odpor bariérové vrstvy, j je imaginární jednotka a $2\pi f = \omega = [1.s^{-1}]$ je úhlová rychlost.

1.3.3 Nelineární základní model

Pro možnost použití modelu při vysokých amplitudách byl rezistor R_p nahrazen nezávislou konduktancí G_{var} . Výsledná impedance je vyjádřena vztahem [20]:

$$\mathbf{Z}(f) = R_s + \frac{1}{G_{var} + j2\pi f G_{var} \tau_z}, \tau_z = \frac{C}{G_{var}}, \quad (1.2)$$

kde $\mathbf{Z}(f) = [\Omega]$ je komplexní impedance, $R_s = [\Omega]$ je odpor kůže, $C = [F]$ je kapacitance bariérové vrstvy, $G_{var} = [S]$ je nezávislá konduktance bariérové vrstvy, j je imaginární jednotka $2\pi f = \omega = [1.s^{-1}]$ je úhlová rychlost a $\tau_z = [s]$ je charakteristická relaxační doba obvodu [20].

1.3.4 Cole-Cole model

Čtenář by měl být předem upozorněn, že název tohoto modelu je poměrně rozporný. Ruwansiri [19] ho nazývá Cole-Cole model a Grimmes [20] rozlišuje Cole model jako model impedance kůže a Cole-Cole model jako model permitivity. Pouze z důvodu, že následující model se nazývá None-Cole, byl upřednostněn pro tuto práci první název.

Základním vztahem pro impedanci v Cole-Cole modelu je [3]:

$$\mathbf{Z}(f) = R_s + \frac{R_0 - R_s}{1 + (j2\pi ft_Z)^\alpha}, \quad (1.3)$$

kde R_0 je odpor za nízkých frekvencí, t_Z je charakteristická časová konstanta systému udávající i charakteristickou úhlovou frekvenci $\omega_Z = \frac{1}{t_Z}$ a α je exponent.

Člen $2\pi ft_Z$ je bezrozměrný a $j2\pi ft_Z$ je výraz určující prvek s konstantní fází za předpokladu, že α je konstanta, protože platí:

$$j^\alpha = \cos(\alpha\pi/2) + j\sin(\alpha\pi/2), \quad (1.4)$$

kde $\alpha = \frac{\varphi_{CPE}}{90^\circ}$.

Samotný CPE je ekvivalentní obvodu s rezistorem a kapacitorem, pokud jsou oba frekvenčně závislé (neideální) pak fáze φ_{CPE} se stane frekvenčně nezávislou.

Zavedením $R_0 - R_s = 1/\Delta G$ dostaneme vztah pro impedanci, který již odpovídá schématu z obr. 1.3c:

$$\mathbf{Z}(f) = R_s + \frac{1}{\Delta G + \Delta G(j2\pi ft_Z)^\alpha}. \quad (1.5)$$

1.3.5 None-Cole model

Na obrázku 1.3d je uveden None-Cole model zveřejněný v práci doktora Grimese [3]. Autor zde uvádí, že časová konstanta tkáně je závislá na konduktanci a Cole-Cole model neodpovídá relaxační teorii (v tomto modelu je časová konstanta nezávislá). Model využívá také prvek s konstantní fází a zavádí volný konduktanční/rezisteční parametr G_{var} . Impedance je pak vyjádřena jako [20]:

$$\mathbf{Z}(f) = R_s + \frac{1}{G_{var} + G_1(j2\pi ft_Z)^\alpha}. \quad (1.6)$$

2 DYNAMICKÁ ELEKTRO-NEUROSTIMULACE

V této diplomové práci bude pro metodu dynamické elektroneurostimulace použita zkratka DENS.

2.1 Historické kořeny

Metoda DENS je historicky založena na principu akupunktury a akupresury.

Akupunkturní praxe se poprvé objevila v starobylé Číně. Je to preventivní, diagnostická i léčebná metoda postavená na principu vpichu jehel do určitých bodů na kůži. O stáří této metody se vedou př. Důkazy v podobě kostěných jehel ale spadají již do neolitické doby (mladší doba kamenná). Později se používalo kamenných jehel (2000 let př. n. l.). Vývojem se postupovalo od bronzových jehel až k těm moderním z oceli. První systematické uspořádání citlivých bodů se dochovalo v památkách z třetího století př. n. l. O 600 let později bylo již popsáno 600 bodů lidského těla s propracovanou indikací i kontraindikací. Dalším zkoumáním byla vyvinuta i jiná podoba této léčby využívající specifických bodů na pokožce ucha [7].

Je důležité mít na zřeteli, že původní metoda byla spojována s taoistickou filozofií a principem Jing a Jang (základní teorie bytí). Pokud ale zavrhneme tento nádech mystična, nelze popřít pozitivní léčebné výsledky tisícileté praxe [7].

Akupresura vychází ze stejných základů jako akupunktura. Její historický vývoj nelze tak jednoduše dokumentovat díky neexistujícímu hmotnému dědictví. Akupresura je neinvazivní metoda využívající bodů lidského těla. Místo jehly se používá tlak (prstů, dlaní, různých nástrojů). Pro laickou veřejnost je tak přístupnější. Na světě je několik propracovaných systémů například *ŠIA-CU*, *DO IN* nebo klasická čínská akupresura [8].

I když díky tisíciletému empirickému výzkumu byly metody velmi dobře prostudované, pro kontinentální a potažmo i zaoceánské společnosti se asijské metody zdály být příliš exotické. Možná proto byly až na konci 19. století popsány doktorem G. A. Zacharjinem a H. Headem lokality na kůži, na nichž při různých onemocněních dochází ke změnám a jsou spojeny s bolestí. Francouzský lékař G. Yavorsky zavedl název **reflexní terapie** pro nám známé léčebné působení vyvolávající neurochemické mechanismy v organismu. Tento termín dnes označuje mnohé diagnostické, terapeutické a preventivní postupy [21].

Do této skupiny můžeme zařadit i metodu DENS. Je založena na výzkumech doktora Reinholda Volla (Německo), který v 50. letech 20. století vynalezl elektronické testovací zařízení, pomocí kterého se snažil nalézt akupunkturní body. Byl úspěšný, tyto body měly na rozdíl od okolní tkáně jinou rezistivitu. Voll pak zasvětil

celý život hledání spojitostí mezi nemocemi a změnou resistance různých akupunkturních bodů. Jeho záměrem bylo indikovat nemoci dříve, než vypuknou v celém rozsahu [22].

Na těchto základech započal v Rusku v 60. letech přísně utajovaný výzkum financovaný sovětským programem pro kosmonautiku. Při vesmírných cestách totiž medikamenty mění své účinky, a jsou proto nepoužitelné. Vědci také nemohli odhadnout, jaké účinky bude mít dlouhodobý pobyt člověka ve vesmíru, a proto se snažili vytvořit univerzální léčebnou metodu. Prvním výstupem byly přístroje pod označením SCENAR (Self Controlled Energo Neuro Adaptive Regulator), které však nebyly adaptibilní. Výzkum trval až do roku 2000, kdy byl odtažen první komerční přístroj společnosti DENAS MS [29], která výrobky DENAS a DiaDENS (diagnostický dynamický elektroneurostimulátor) distribuuje do celého světa. Jako každý nový pokrok v medicíně, je i tento pozvolna přijímán. Například v Ruské federaci byl jako léčebná metoda schválen až v roce 2005. V současnosti se metoda využívá v Maďarsku, Polsku a Německu, kde se dokonce vyučuje na Lékařské fakultě v Berlíně [23].

Metoda DENS a výrobky DiaDENS jsou neustále zdokonalovány, ročně vychází stovky vědeckých článků z různých koutů světa. Odhaduje se, že zatím bylo klinicky odzkoušeno a popsáno 50–60% medicínských směrů a diagnóz, kde terapie účinně zasahuje. Každoročně probíhá pod záštitou Ministerstva zdravotnictví Ruské federace lékařský kongres, kde se prezentují klinické výsledky v nemocnicích a fakultách. V ČR je praxe zatím v počátcích, lze ji najít v rukou některých soukromých klinik, jako alternativa ke klasické léčbě.

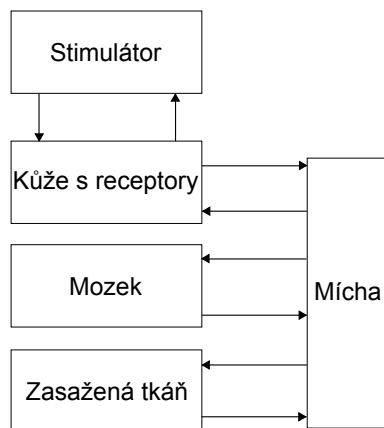
2.2 Podstata metody

V lidském těle se vytváří spousta tzv. biosignálů, mezi něž patří i elektrické signály putující nervovou soustavou čit biosig. Nervovou soustavu tvoří nervová zakončení (receptory), od kterých signál putuje nervy do míchy, umístěné v páteři, a následně do mozku, kde jsou informace zpracovány jako v procesoru počítače, a na výstupu je nový signál, který tkáním a orgánům nařizuje reakci (hormonální regulace, krevní cirkulace). Na této spletité cestě může dojít různými vlivy, zmíněnými v úvodu práce, ke zkreslení signálu. Mozek tak nemusí reagovat správně.

Princip metody DENS je založen na metodě elektrické neurostimulace, při které se působí na nervová zakončení v příslušných bodech a nervových drahách. Navíc však dokáže zpětný signál zpracovat a dynamicky reaguje na změnu v tkáni. Jak už bylo řečeno v předchozí kapitole, elektrická neurostimulace je postavena na základech akupunkturního a akupresurního léčitelství.

Funkci přístroje jednoduše popisuje blokové schéma na obr. 2.1. Je založena na tzv. biologické zpětné vazbě. Impulzy z přístroje se stimuluje mozková činnost. Mo-

zek tak následně reaguje zvýšením cirkulace krve v postižených tkáních. V krvi je obsažena glukóza a kyslík. Okysličováním dochází k odbourávání volných radikálů. Je důležité poznamenat, že přístroj nepůsobí primárně na zasažené místa, pouze dopomáhá mozku k podnícení obranné reakce [10].



Obrázek 2.1: Blokové schéma metody DENS.

2.3 Znaky DENS

Mezi základní vlastnosti metody DENS patří [24]:

- Monitoring povrchové impedance kůže na základě změn odezvy na signál. Nedochozí tak ke snížení účinnosti, jelikož nedojde k otupění reakcí na vstupní elektrický impuls.
- Oproti klasickým reflexním terapiím má mnohem vyšší účinek.
- Snižuje výlučnost s ostatními léčebnými postupy (medikamenty) na minimum.
- Díky moderním prvkům lze sestavit přenosné zařízení vhodné pro použití kdekoliv a kdykoliv.

DENS má širokou působnost [12]:

- Analgetizace, neboli snížení bolestivosti.
- Protizánětlivost.
- Regulace napětí cévních stěn, čímž se usměrňuje prostupnost krve.
- Zlepšení tzv. mikrocirkulace, tedy krevního oběhu mezi cévkami a orgány.

- Antipyretické účinky – snižování horečky.
- Působí protialergicky a podporuje imunitu.
- Úprava napětí hladkého a kosterního svalstva.

2.3.1 Indikace

- Prevence onemocnění, recidiv chronických chorob, funkčních poruch, konkrétních symptomů (příznaků) a syndromů (kombinací příznaků) většiny známých nemocí včetně korekce poruch v předklinickém stadiu pomocí metod tradiční diagnostiky.
- Zvětšení adaptability organismu, prevence a odstranění chorobných stresových reakcí v podmínkách působení nepříznivých patogenních faktorů, jako jsou:
 - namáhavá fyzická a duševní práce, fyzické a psychické přetěžování, chronický únavový syndrom, obtížné ranní probouzení, ospalost ve dne, poruchy usínání, nespavost, podrážděnost, plačtivost, depresivní stavy, poruchy pohlavních funkcí, prevence nachlazení.
- Léčba náhlých (akutních) a vleklých (chronických) bolestivých syndromů.
- Oprava funkčních závad orgánů u nemocí kardiovaskulárního, kosterního, svalového, nervového, endokrinního a močopohlavního systému, onemocnění dýchacích a trávicích orgánů, uší, nosu, krku, očí a kůže.
- Rehabilitace po nemocech, operacích a utrpěných úrazech [10].

2.3.2 Kontraindikace

Kontraindikace se mohou dle osvědčení o registraci [10] rozdělit na absolutní, tedy ty naprosto vylučující, a na relativní, kdy jsou možné pouze po konzultaci s lékařem, nejlépe za jeho asistence.

Absolutní kontraindikace [10]:

- Nesnášenlivost jedince na elektrický proud.
- Voperovaný kardiostimulátor.

Relativní kontraindikace [25]:

- Epileptický záchvat (epileptikům je naopak metoda doporučována).
- První měsíc těhotenství.
- Výskyt novotvarů (vyžaduje se vyšetření původu).

- Horečky bez zjevných příčin.
- Cévní trombózy.
- Po požití psychotropních látek, alkoholu a selhání psychiky – dekompenzace.

2.3.3 Kombinace s dalšími léčebnými postupy

Kombinování několika léčebných metod se nazývá komplexní terapie. Tato se musí důmyslně volit tak, aby došlo ke sčítání jejich účinků.

Metodologové připouští použití sloučení metody DENS s ostatními reflexními terapiemi (akupunktura, akupresura, cubo, farmakopunktura), s bahenními koupelemi, homeopatickými preparáty, rekonvalescenčními terapiemi, dietou a také s medikamenty. Metoda také umožňuje snížení dávek farmakologických přípravků, jakožto i dobu jejich užívání. Nedoporučuje se DENS praktikovat ve stejný den jako jiné elektroléčebné procedury [25].

3 REALIZACE METODY DENS

V předcházející kapitole bylo uvedeno, že výhradním výrobcem zařízení pro DENS je původem ruská společnost DENAS [29], která je vyrábí ve formě přístrojů nazvaných DiaDENS a DENAS. Zařízení získaly evropský certifikát ISO 9001 [26].

3.1 DiaDENS zařízení

Výrobce přístrojů se samozřejmě snaží v průběhu času aparát modernizovat. Určitý obrázek si můžeme udělat z propagačního letáku na obr. 3.6. V současnosti jsou na trhu dostupné tyto varianty:

- **DENAS** – zařízení určené pro první pomoc a pro některé chronické potíže. Obsahuje mód *THERAPY* pracující na frekvenci 77 Hz pro nalezení patologických bodů a následné léčení. Druhým módem je *TEST* určený pro rychlejší nalezení postižených bodů na kůži.



Obrázek 3.1: Zařízení DENAS [29].

- **DENAS 2011** – oproti předchozí verzi je menší, má podsvícený display, časovač, přímé propojení s novým příslušenstvím a režim *THERAPY* rozšiřuje o frekvenci 140 Hz pro rychlejší úlevu od bolesti.



Obrázek 3.2: Zařízení DENAS 2011 [29].

- **DENAS mini** – cenově dostupnější verze DENAS 2011 s jedním režimem na frekvenci 77 Hz.



Obrázek 3.3: Zařízení DENAS mini [29].

- **DiaDENS-PCM** – sofistikovanější verze s 15 programy pro různé nemoci. Má tři režimy. *THERAPY* mód pracuje na frekvencích $f=\{10, 20, 60, 77, 140, 200\}$ Hz, na modulovaných signálech 77AM (resp. 77/10) a na nízkých frekvencích 1-9,9 Hz. *MED mode* je obdobou *TEST* módu pracující na frekvenci 10 Hz a konečně *SCREENING* režim, který umožňuje ještě rychlejší nalezení patologických oblastí.



Obrázek 3.4: Zařízení DiaDENS-PCM [29].

- **DiaDENS-T** – cenově dostupnější zařízení, které postrádá modulované a nízké frekvence a nemá přednastavené programy jako DiaDENS-PCM.



Obrázek 3.5: Zařízení DiaDENS-T [29].

- **DiaDENS-PC** – profesionální přístroj, který je k dispozici pro tuto práci. V následující sekci bude podrobněji popsán.

V nabídce jsou také úzce zaměřené druhy jako **LADOS** (snížení bolestivosti u poranění), **DiaDENS Cardio** (korekce krevního tlaku), **ZooDENS** (zařízení určené pro léčbu zvířat), **OsteoDENS** (problémy bolesti krční páteře), **DiaDENS Cosmo** (pleťová maska) a na závěr **Vertebra** pro komplexní účinky na celou oblast zad.



Obrázek 3.6: Vývoj přístrojů DENAS [29].

3.2 DiaDENS-PC

DiaDENS-PC je multifunkční aparát určený pro terapeutu a specialisty na akupunkturu. Přístroj pracuje na stejných frekvencích jako přístroj DiaDENS-PCM, používá i stejné zonální diagnostické režimy. Hlavním benefitem je přítomnost čtyřech bodových diagnostických módů. Tyto jsou s výhodou používány v propojení s PC se speciálním softwarem.

Diagnostika je založena na posuzování tzv. meridiánů (z čínského lékařství) a biologických bodů známých z akupunktury a akupresury na těle včetně ušního boltce. S pomocí dodávaného softwaru lze rychle najít narušené tkáně a orgány a diagnostikovat nemoci dříve, než propukne jejich klinický následek.

3.2.1 Funkční režimy

Jak už bylo řečeno je přístroj vybaven čtyřmi zonálními režimy [11]:



Obrázek 3.7: Profesionální aparát DiaDENS-PC [29].

- **TEST** – slouží k vyhodnocení funkčního stavu orgánů a systému v organismu. Prakticky se hledají oblasti na kůži, kde se elektrický odpor výrazně liší od sousedních oblastí (latentní triggerové zóny). Také se využívá k ošetření oblastí s přímou projekcí problému. Používají se zabudované elektrody aparátu a měření pracuje na frekvenci 10 Hz.
- **SCREENING** – principem je rychlé nalezení latentních triggerových zón, např. před použitím jiného režimu. Používají se také zabudované elektrody aparátu a měření pracuje na frekvenci 10 Hz.
- **THERAPY** – režim terapie se používá k ošetření zón a bodů.
 - *1,0 až 9,9 Hz (krok 0,1 Hz)* – vychází z výstupu diagnostik režimů **VOLL** a **BIOVOLL**. Ošetřovací frekvence je individuální a založená na analýze hodnot diagnostických režimů.
 - *10, 20 Hz* – aplikují se na zóny přímé projekce, univerzální i systemické zóny. Efekt byl prokázán na vnitřních orgánech, kloubech, svazech i poúrazové a rekonvalescenční období.
 - *60, 77 a 140 Hz* – aplikace na přímé, segmentární i triggerové zóny. Indikace na záněty a poruchy vnitřních orgánů a poruchy prokrvení.
 - *200 Hz* – používá se pouze v přímé projekční zóně. Působí na silné bolesti po úrazech.
 - *77/10* – relaxační režim, vyvolává uvolnění a pocit ospalosti. Používá se pro zmírnění bolesti, zlepšení spánkové funkce a pro relaxaci nervového vzrušení.
 - *77AM* – opačný efekt. Byly zjištěny i antidepressivní účinky.
- **MED** – používá se při očekávání náročné fyzické a duševní práce, vypětí, při chronickém únavovém syndromu, poruchách spánkového režimu i prevenci před nachlazením. Je to přednastavený program.

Aparát nabízí také čtyři diagnostické režimy [11]:

- **VOLL** – režim založený na výzkumech Dr. Volla, viz kapitola 2.1. Metoda elektropunkturní diagnostiky využívající externí elektrody. Posuzuje se stav všech vnitřních orgánů s ohledem na elektrické kanály. Používá se i pro určení vhodných medikamentů, homeopatik a doplňkových přípravků.
- **BIOVOLL** – zdokonalení režimu VOLL o individuální charakteristiky.
- **BIOREPER** – analogická metodě BIOVOLL pro měření na ušním boltci.
- **Mini AS** – elektropunkturní diagnostika v miniakupunkturních systémech ruky a hlavy. Umožňuje na základě opakujících se testů dynamicky vyhodnotit funkční stav napadených tkání.

3.2.2 Zóny a body působení

V předchozí části textu byly zmíněny některé zóny působnosti metody DENS, zde jsou přehledně uspořádány a vysvětleny:

- **Lokální ohniska zasažení** – zóna přímé projekce potíží pacienta. Nejjednodušší a nejefektivnější oblast působení DENS. Jedná se buď o přímo ohniska bolesti (rány, modřiny), nebo o přímou povrchovou kožní projekci orgánu s narušenou funkcí.
- **Matamerické a segmentální** – nervový systém člověka je založen na sběrníkové topologii, existují tedy nervy, které přenášejí jako sběrnice mnoho signálů přijatých od koncových bodů. Aplikace na zjištěné kožní místa tak působí na tkáň se společnou nervovou cestou.
- **Zóna obecného působení** – aplikuje se na velké nervové útvary s očekávaným všeobecným působením a zlepšení celkového stavu.
- **Triggerové** – jsou to individuální zóny, které se vytvoří na určitých ohraničených oblastech kůže, svalech, šlachách a okostnici. Mohou být zjištěné vizuálně (pigmentace) i pocitově (bolest). Nejsou systematické a musí se posuzovat u každého člověka různě. Existují aktivní (lokální zóny nepřímé bolestivosti a zvýšené citlivosti) a pasivní (zjistíme v režimu TEST) triggerové zóny [10].

4 MODEL NÁHRADNÍHO OBVODU IMPEDANCE KŮŽE

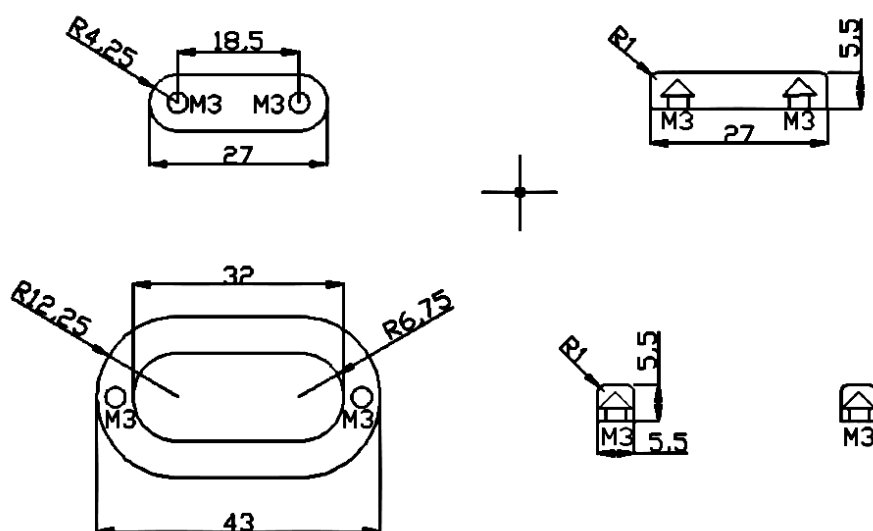
4.1 Měření impedance kůže

Aby bylo možné detailně prostudovat signálové vlastnosti přístroje DiaDENS, bylo nutno provést empirické měření impedance lidské kůže, které by tvořilo informační základ pro praktickou realizaci elektrického modelu lidské kůže.

4.1.1 Použité elektrody

Pro měření byly použity elektrody z bakalářské práce Míky [12]. Jak autor uvádí, použití jakýchkoli jiných elektrod by vedlo k nepřesnosti měření. Proto vyrobil repliku vestavěných elektrod zařízení DiaDENS. Na obr. 4.1 je znázorněn konstrukční výkres, dle kterého byly elektrody zhotoveny.

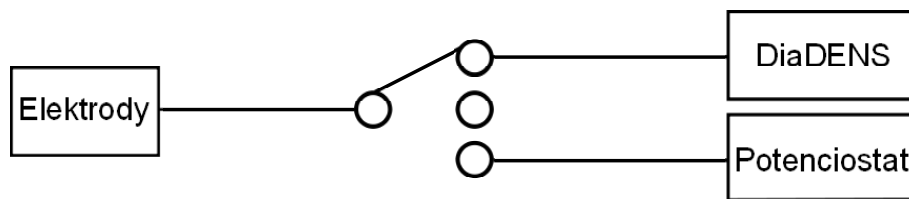
Samotné elektrody jsou vyfrézovány z korozi-vzdorné oceli, mezi něž byla při výrobě vlita epoxidová pryskyřice.



Obrázek 4.1: Konstrukční výkres elektrod.

4.1.2 Měřicí přípravek

V práci [12] byla elektroda při měření na kůži připevněna lepicí páskou. Pro snadnější opakované měření na více subjektech byl pro tuto práci zhotoven jednoduchý měřicí přípravek, jehož blokové schéma je zobrazeno na obr. 4.2.



Obrázek 4.2: Blokové schéma zapojení přípravku.

Na základě tohoto schématu byl přípravek zhotoven následovně (obr. 4.3):

- Elektrody byly vsazeny mezi stahovací popruh a původní pryžové madlo (popruh byl původně určen k brašně) a zafixovány šrouby.
- Přepínač byl vsazen do jednoduchého boxu, aby nedocházelo ke zkratu kontaktů.
- Na první vývod byl napájen konektor jack 3,5mm kompatibilní s výstupním konektorem DiaDENS pro připojení externí elektrody.
- Druhý vývod byl opatřen zdírkami kompatibilními s banánky výstupních kabelů spektroskopu.



Obrázek 4.3: Vyrobený měřicí přípravek.

4.1.3 Impedanční spektroskop

K měření byl použit potenciostat BioLogic VMP3 [30]. Tento šestnácti kanálový přístroj má funkci elektrochemické impedanční spektroskopie, která byla k měření použita. Analyzátor má rozsah $10 \mu\text{Hz}$ až 1 MHz .



Obrázek 4.4: BioLogic VMP3 [30].

Nedílnou součástí VMP3 je softwarový balík EC-Lab, umožňující shromáždění a následnou komplexní analýzu dat [31].

4.1.4 Příprava kůže

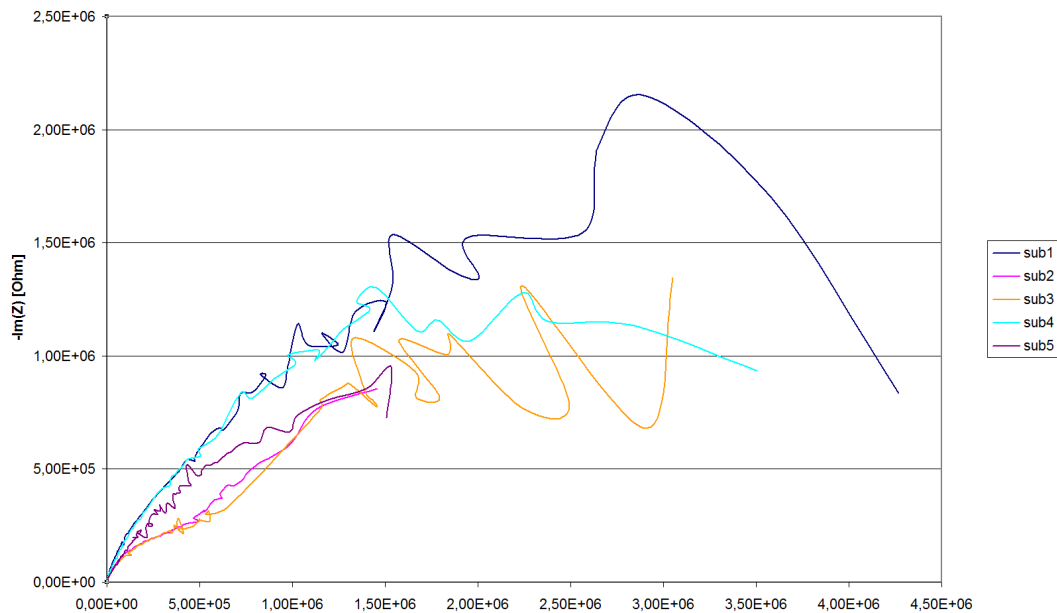
Na kůži obvykle zůstávají zbytky vysušeného potu, proto je lepší před měřením kůži očistit, čímž zabráníme vzniku větších chyb. V odporu po umytí destilovanou vodou, éterem nebo acetonem není žádný rozdíl, ale po umytí mýdlem dojde k vysušení a dalším reakcím a změně impedance. Kůže subjektů měření by tedy měla být před zahájením měření ošetřena. V měřeném místě by neměla být žádná ranka v kůži (například poškrábání) [13]. V případě této práce bylo použito omytí destilovanou vodou.

4.1.5 Nastavení spektroskopu

Nastavení impedančního spektroskopu se provádí v programu EC-Lab. Před samotným měřením bylo nutné nastavení odladit, jelikož špatné nastavení může vést buď k nesmyslně časově náročnému měření, nebo k nerelevantním výsledkům. Příklad nekorektních výsledků je uveden na obr. 4.5. Chyby byly navíc umocněny nedostatečně ošetřenou kůží u všech pěti subjektů. Z grafu lze sice rozpoznat náznak Coleova půlkruhu, ale takovéto výsledky by byly těžko obhajitelné.

- Spektroskop pracoval v režimu PEIS (Potentio electrochemical impedance spectroscopy). Jedná se o režim aplikující sinový signál okolo zadaného potenciálu.

- Multisinusový mód (měření více frekvencí najednou).
- Potenciál $E = 0$ V.
- Rozsah měření $f_i = 500$ kHz až $f_f = 0,5$ Hz.
- Skenování třiceti bodů na dekádu $N_d = 30$.
- Amplituda sinusového signálu $V_a = 20$ mV.
- Čekat $p_w = 0,1$ periody před změnou frekvence.
- Každý bod byl proměřen třikrát $N_a = 3$.



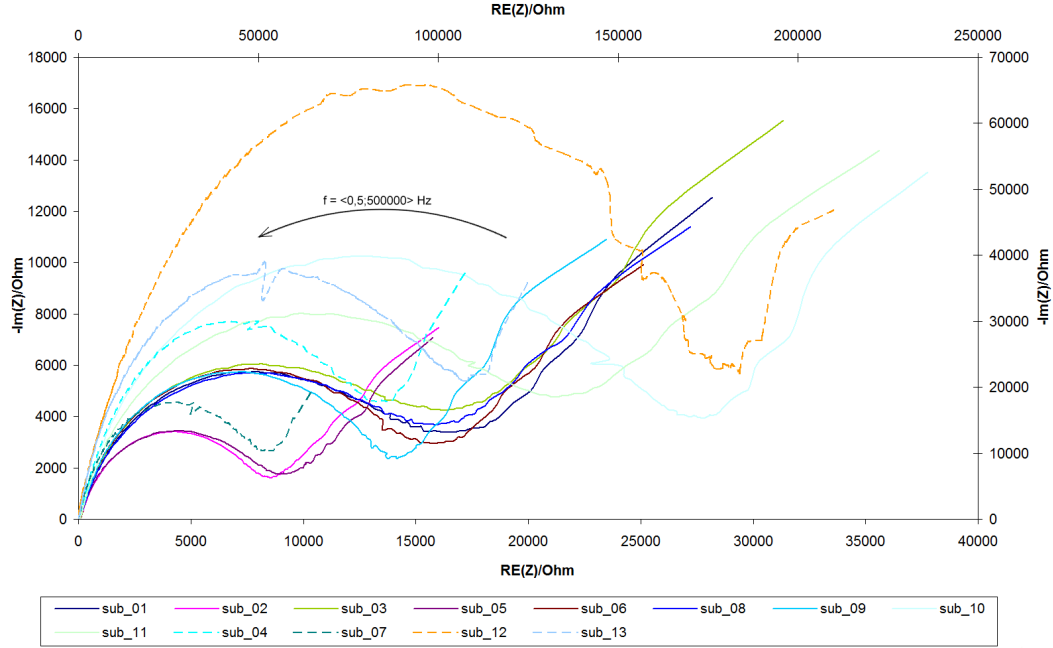
Obrázek 4.5: Neakceptovatelné výsledky testovacího měření.

4.2 Analýza dat pro statický model

Statický model impedance kůže byl měřen na čtrnácti subjektech (věk 20–27 let, váha 65–90 kg, teplota 25 °C a relativní vlhkost 60–70 %) při nulovém působení přístroje DiaDENS, tedy čas působení byl $t = 0$ s.

Před statistickou analýzou dat byl z procesu vyřazen jeden subjekt, jelikož změřené hodnoty byly několikanásobně větší, než u ostatních měření. Pro úplnost nutno dodat, že to byl právě první testovaný subjekt. Chybu tedy můžeme odůvodnit nedostatečnou přípravou měření, která se v dalších měření neprojevila.

Změřená data byla vynesena do grafu 4.6. Pro zachování dobré rozlišovací schopnosti byly některé průběhy vyneseny na vedlejší osy v jiném měřítku (zobrazeny přerušovanou čarou). Lepší rozlišení hodnot je možné dosáhnout prostudováním dat v elektronické příloze, viz seznam v části B, resp. v celostránkové verzi grafu v příloze A.



Obrázek 4.6: Průběhy impedance třinácti subjektů.

4.2.1 Korelační analýza

Je dokázáno, že i když je impedanční charakteristika u každého jedince různá a je různá i v čase, je charakter křivky stejný [3]. Ostatně jinak by ani nemohly existovat modely impedance kůže.

Pro vyloučení méně nápadných odlišností v naměřených datech lze s jistotou použít korelační analýzu. Analyzujeme závislost dvou proměnných $Re(x)$ a $Re(y)$ (resp. $Im(x)$ a $Im(y)$), kde x je číslo jednoho subjektu a y je číslo druhého subjektu (subjekty jsou rozlišeny číselně 1–13). Srovnáváme zvláště reálné a imaginární části impedance \mathbf{Z} . Korelační analýzou vypočítáme Pearsonův korelační koeficient r [14]. Korelační koeficient nabývá hodnot z intervalu $\langle -1; 1 \rangle$, přičemž hodnota -1 značí nepřímou závislost, hodnota 1 přímou závislost a hodnota 0 nezávislé veličiny. Obecný vztah (4.1) pro získání koeficientu r dvou proměnných x a y je

určen takto [14]:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (4.1)$$

V tabulkovém procesoru EXCEL se pro výpočet používá funkce *CORREL*. Jednotlivé průběhy byly navzájem analyzovány. Každé měření bylo srovnáno s ostatními. Výsledná korelační tabulka je uvedena v elektronické příloze.

Výsledky měření:

- Aritmetický průměr všech pearsonových koeficientů je $\bar{r} = 0,94$.
- Medián hodnot je $\tilde{r} = 0,97$.
- Minimální korelace $\min(r) = 0,59$.
- Maximální korelace $\max(r) = 1,00$.

Závěrem této fáze lze říct, že všechna měření vzájemně silně korelují, a proto jsou data vhodná pro následné zpracování a vytvoření náhradního obvodu.

4.2.2 Interpretace dat do modelu

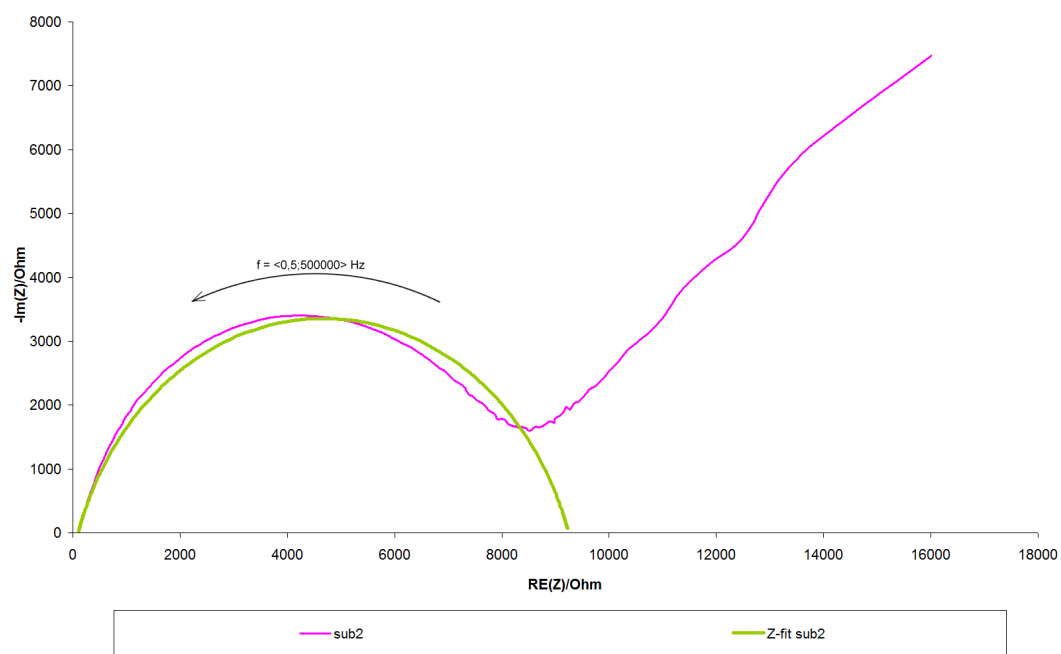
K praktické realizaci modelu impedance kůže byl zvolen Coleův model z kap. 1.3.4. V programu EC-lab lze jednoduše získat parametry ekvivalentního obvodu pomocí funkce *Z-fit*. Jednotlivé průběhy byly funkcí analyzovány za tohoto nastavení:

- Metoda *Randomize + Simplex*
- Frekvenční oblast 500 kHz až 50 Hz.
- Zastavit Randomize po 50 000 iteracích.
- Zastavit fitování po 10 000 iteracích.

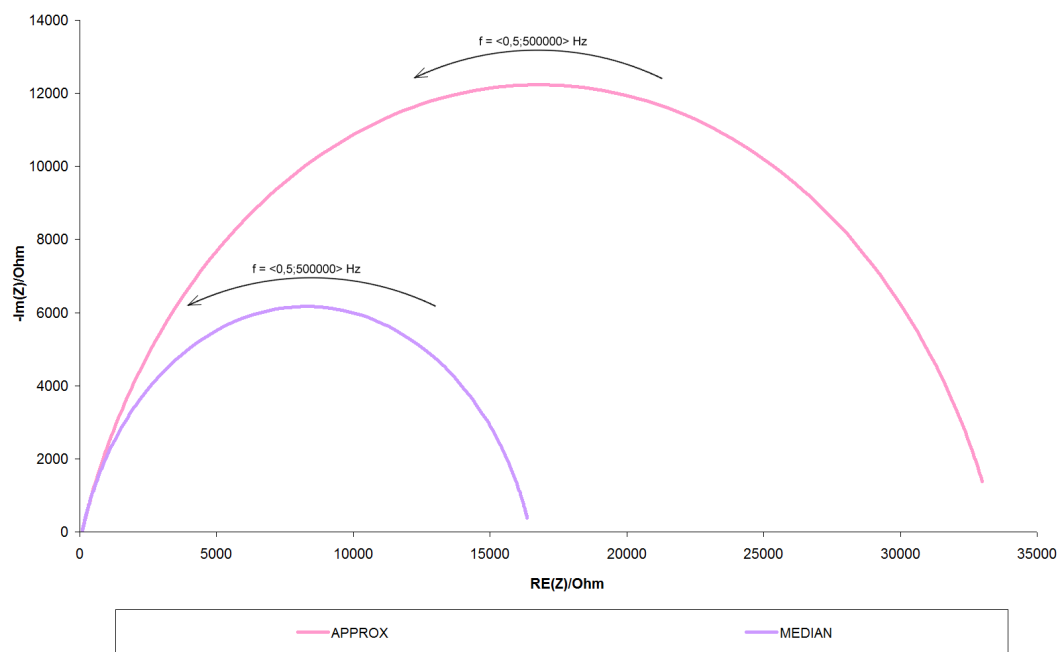
Ukázka výstupu funkce *Z-fit* ve srovnání s naměřeným průběhem viz obr. 4.7. Jednotlivé parametry prvků náhradních obvodů jsou uvedeny v elektronické příloze. Pro závěrečné rozhodnutí byly z těchto dat vytvořeny dvě simulace, a to s aritmetickými průměry parametrů prvků, resp. s mediány prvků. Simulace proběhly opět v aplikaci EC-Lab funkcí *Z-sim* a jsou zobrazeny v grafu 4.8. Aritmetický průměr je zde uveden spíše pro zajímavost, jelikož je dokázáno, že v podobných biostatistických případech je nejvhodnější použití mediánu či geometrického průměru [15].

Parametry simulovaných obvodů:

- **APPROX:** $R_s = 81,63 \Omega$, $R_p = 33,42 \text{ k}\Omega$, $Q = 1,54E-07 \text{ F.s}^{\alpha-1}$, $\alpha = 0,805$.
- **MEDIAN:** $R_s = 84,45 \Omega$, $R_p = 16,39 \text{ k}\Omega$, $Q = 1,67E-07 \text{ F.s}^{\alpha-1}$, $\alpha = 0,822$.



Obrázek 4.7: Příklad průběhu ekvivalentního obvodu vymodelovaného z naměřených dat.



Obrázek 4.8: Výsledné simulované průběhy.

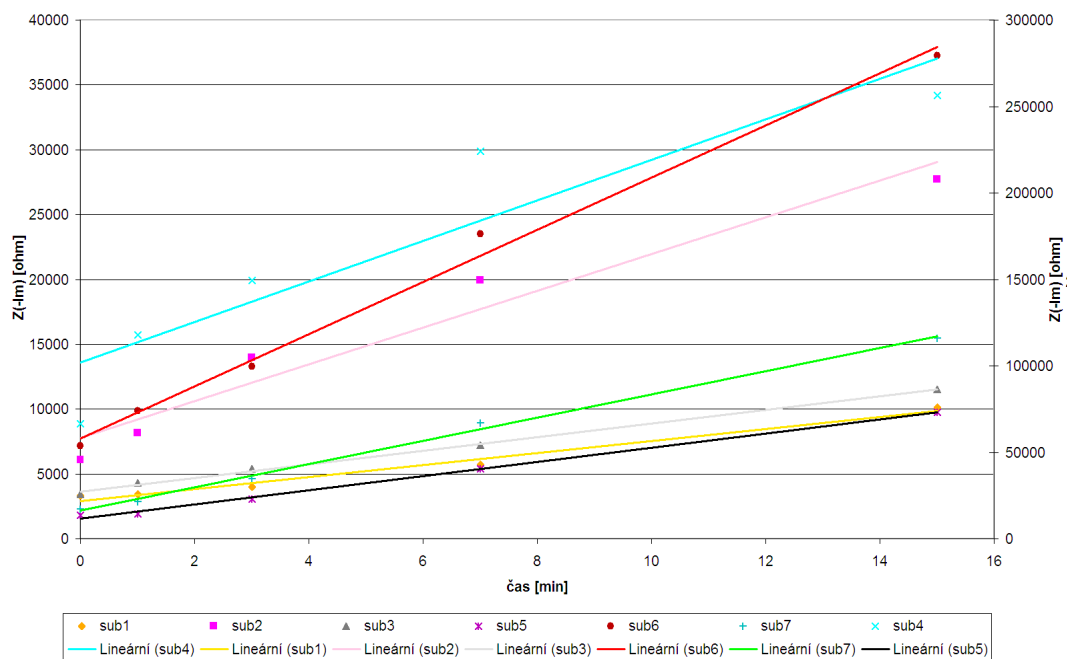
4.3 Analýza dat pro dynamický model

Aby mohl být statický model rozšířen o vliv přístroje DiaDENS, bylo provedeno měření ve stejném zapojení na vhodných osmi subjektech. Přístroj byl aplikován v posloupnosti $t_a = \{1, 2, 4, 8\}$ min. Mezi jednotlivými aplikacemi přístroje byly změřeny změny impedance kůže. Předpokládáme, že působením elektrického proudu se mění parametry kůže a tyto se nevrací okamžitě do původních hodnot, ale pohybují se v určité hysterzi. Měření bylo realizováno v $t = \{0, 1, 3, 7, 15\}$ min.

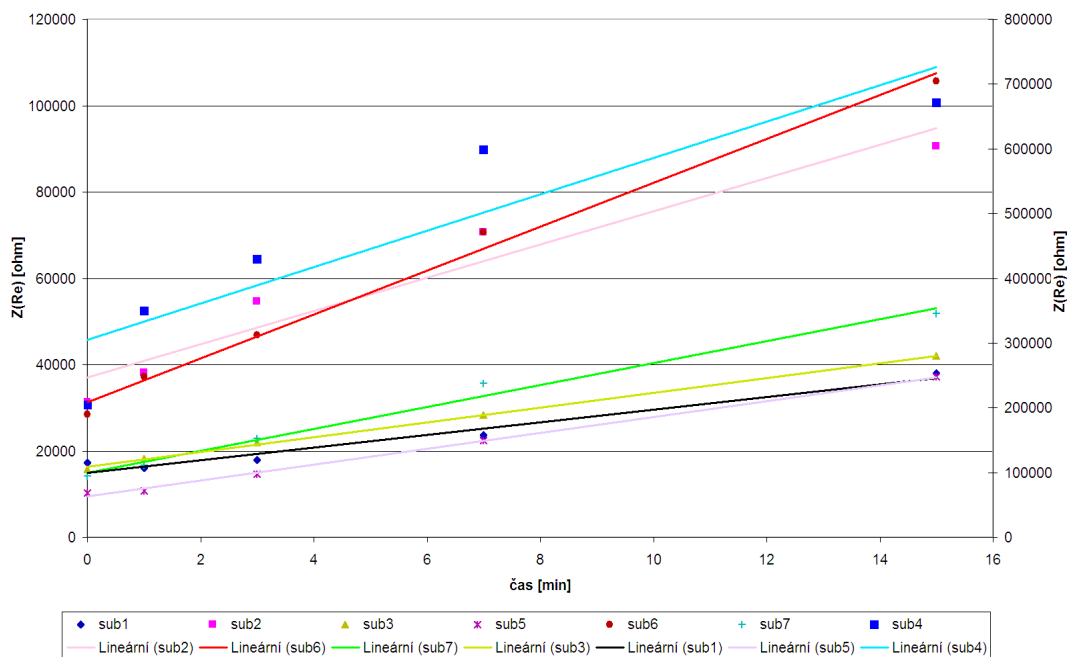
Ze stejného důvodu jako v předchozí úloze byla jedna sada hodnot vyřazena z analýzy.

Z předchozího měření již vyplynulo, že průběhy impedance kůže silně korelují. Předmětem tohoto experimentu je zjistit tendence a rozlišit případné vztahy mezi časem působení a různými parametry. Naměřená data jsou k nahlédnutí v elektronické příloze.

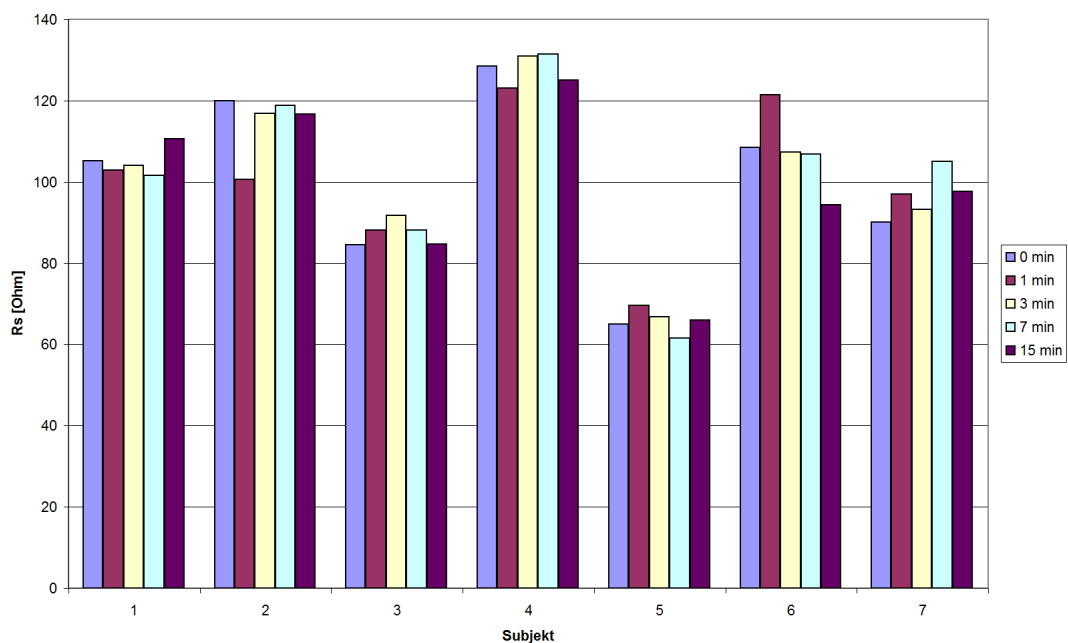
Nejprve byla analýze podrobena základní naměřená data. V grafu 4.9 jsou vynešena maxima imaginární složky impedance v závislosti na čase pro jednotlivé subjekty. Pokud se těmito body proloží přímka vycházející z lineární regrese, nedochází k velkým chybám. Potvrzení této hypotézy je zřejmé z grafu 4.10, kde byla provedena stejná operace, ale na maximech reálné složky impedance.



Obrázek 4.9: Závislost maxim imaginární složky impedance na čase.



Obrázek 4.10: Závislost maxim reálné složky impedance na čase.



Obrázek 4.11: Závislost parametru R_s na čase.

Poslední operací se surovými daty je porovnání stejnosměrného odporu R_s a jeho změn v čase. Z teorie víme [3], že tento parametr je u jednotlivých subjektů a jednotlivých míst na kůži stále stejný. Prakticky byl tento předpoklad potvrzen v grafu 4.11.

Pokud provedeme analýzu směrodatných odchylek parametru R_s dle vztahu pro směrodatnou odchylku [14]:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n}}, \quad (4.2)$$

dostaneme množinu $s_{R_s} = \{2,64; 8,62; 5,05; 3,26; 2,67; 7,13; 3,01\} \Omega$. Odchylka je tedy pod výrobní diferencí používaných rezistorů.

4.3.1 Interpretace dat do modelu

Výchozím modelem pro realizaci obvodu modelu impedance lidské kůže je mediánový statický Coleův model z kap. 4.2.2. V aplikaci EC-lab bylo provedeno fitování za tohoto nastavení:

- Metoda *Randomize + Simplex*.
- Frekvenční oblast 500 kHz až 50 Hz.
- Zastavit Randomize po 50 000 iteracích.
- Zastavit lícování po 10 000 iteracích.

Jednotlivé simulované modely jsou uvedeny v elektronické příloze. Grafickou analýzou parametru Q (graf 4.12) a α (graf 4.13) lze dovodit pozoruhodný závěr: tyto parametry se v čase takřka neliší. Anomálie byla zjištěna pouze u subjektu 4.

Vypočtením směrodatných odchylek těchto parametrů dostaneme množiny:
 $s_Q = \{2,05; 0,99; 1,22; 1,54; 2,21; 0,55; 2,32\} \cdot 10^{-8} \text{F.s}^{\alpha-1}$,
 $s_\alpha = \{0,011; 0,004; 0,006; 0,013; 0,013; 0,005; 0,048\}$. Odchylky jsou tedy o řád menší u obou parametrů.

Z výše uvedených skutečností lze vyvodit, že primárním parametrem dynamické odezvy kůže je parametr R_p . V grafu 4.14 je závislost na čase zobrazena, zde již není nutné určit regrese. Byla určena změna parametru oproti statickým hodnotám R_p (medián hodnot). V tabulce č. 1 jsou tyto změny v podobě násobku hodnot uvedeny. R_p tedy rozšíříme o parametr $\kappa = \bar{\kappa}$ (průměr dílčích hodnot subjektů), kde $R_p \kappa$ určuje hodnotu parametru v čase t .

Vstupními parametry pro realizaci modelu impedance lidské kůže je tedy statický mediánový Coleův model rozšířený o parametr κ :

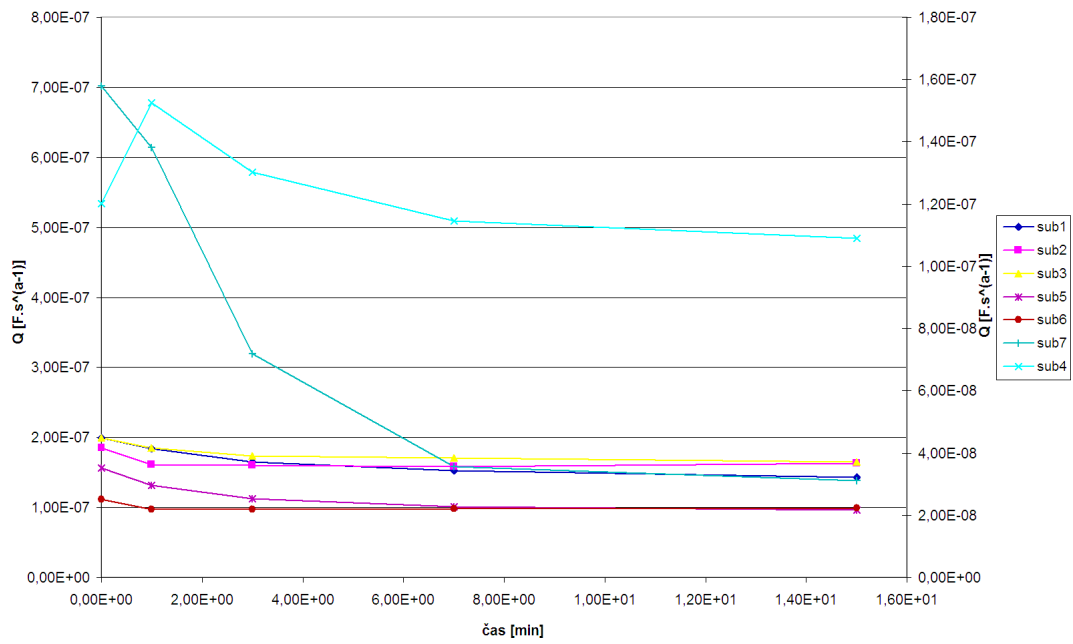
$$R_s = 84,45 \Omega,$$

$$R_p = 16,39 \kappa \text{ k}\Omega,$$

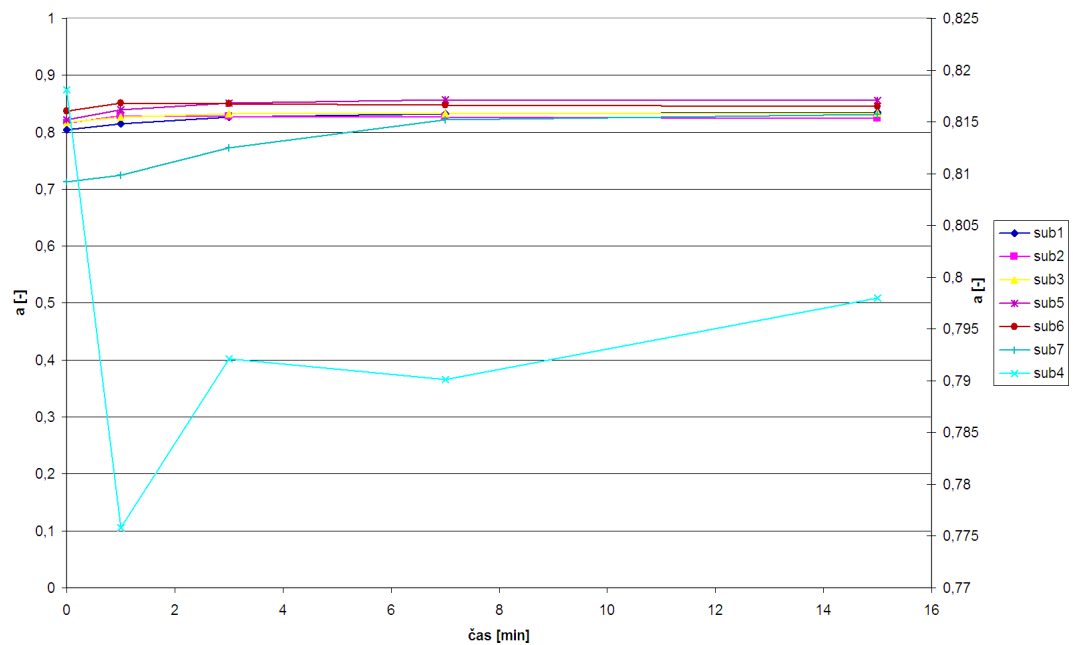
$$Q = 1,67 E - 07 \text{ F.s}^{\alpha-1},$$

$$\alpha = 0,822,$$

$$\kappa = \langle 1; 4,5 \rangle \text{ pro } t = \langle 0; 15 \rangle \text{ min.}$$



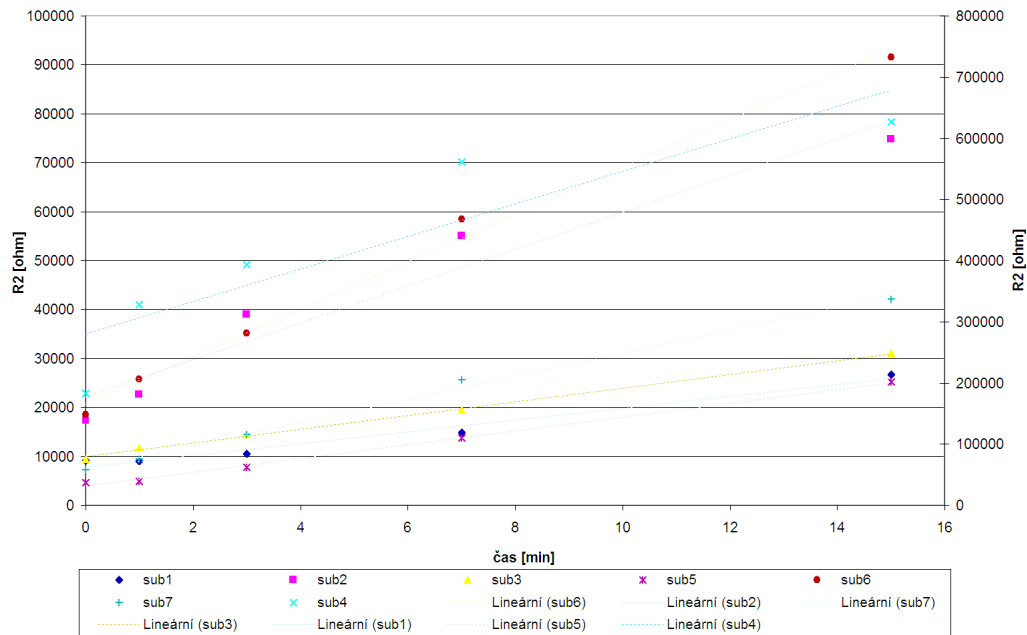
Obrázek 4.12: Závislost parametru Q na čase.



Obrázek 4.13: Závislost parametru a na čase.

Tabulka č. 1 - Parametr κ dynamického odporu R_p .

t [min]	0	1	3	7	15
$\kappa_{sub1}[-]$	1,00	0,98	1,14	1,62	2,91
$\kappa_{sub2}[-]$	1,00	1,31	2,26	3,18	4,33
$\kappa_{sub3}[-]$	1,00	1,25	1,54	2,07	3,30
$\kappa_{sub4}[-]$	1,00	1,79	2,15	3,07	3,43
$\kappa_{sub5}[-]$	1,00	1,06	1,67	2,95	5,42
$\kappa_{sub6}[-]$	1,00	1,39	1,90	3,15	4,94
$\kappa_{sub7}[-]$	1,00	1,30	1,99	3,54	5,82
$\bar{\kappa} [-]$	1,00	1,38	1,83	2,72	4,50

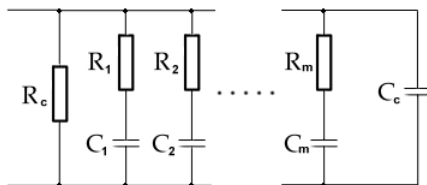


Obrázek 4.14: Závislost parametru R_p na čase.

4.4 Výpočet náhradního obvodu CPE

Prvek s konstantní fází použitý v Coleho modelu impedance lidské kůže je ideální a neexistující součástka. Chování CPE v obvodu se tedy musí taktéž modelovat, a to z reálných a dostupných součástek. K následujícímu odvození a výpočtu jednotlivých prvků modelu CPE byl využit článek [16] od autorů z Vysokého technického učení v Brně.

V návrhu náhradního obvodu se vychází z parametrů Q a α a obecného schématu náhradního obvodu CPE 4.15. Model tvoří m větví sériové RC kombinace a korekční prvky R_c a C_c . Model CPE také nemá konstantní fázi v celém kmitočtovém spektru, frekvenční rozsah ω_{min} a ω_{max} se volí dle požadované aplikace, čím větší rozsah, tím více větví model má. Další omezující vlastností modelu je to, že RC kombinace nemají lineární závislost modulu a fáze na kmitočtu, proto se také volí požadovaný kmitočtový zdvih $\Delta\varphi$.



Obrázek 4.15: Optimální model CPE.

Jako vstupní byly zvoleny parametry odvozené od výstupních parametrů mediánového simulovaného obvodu:

- $D_p = \frac{1}{Q} = 5,99 \text{ M}\Omega$: modul impedance CPE požadovaný.
- $\alpha = 0,822$: exponent impedance CPE $\mathbf{Z}(j\omega) = D(j\omega)^\alpha$ určující kapacitní charakter reaktance nebo induktivní charakter reaktance CPE.
- $\omega_{min} = 6,3 \text{ s}^{-1}$: úhlový kmitočet při frekvenci 1 Hz.
- $\omega_{max} = 62831,8 \text{ s}^{-1}$: úhlový kmitočet při frekvenci 10 kHz.
- $\Delta\varphi = 0,5 \text{ Hz}$: požadovaný kmitočtový zdvih.

Nechť a , b jsou pomocné parametry modelu CPE [16]:

$$ab \cong \frac{0,24}{1 + \Delta\varphi} = \frac{0,24}{1,5} = 0,16 \quad (4.3)$$

$$\log(a) = \alpha \log(ab) = -0,65 \quad (4.4)$$

$$a = 10^{\log(a)} = 0,22, b = \frac{ab}{a} = 0,72. \quad (4.5)$$

Počet větví m volíme dle vztahu:

$$m = \frac{\log\left(\frac{\omega_{max}}{\omega_{min}}\right)}{\log(ab)} = \frac{\log\left(\frac{62831,8}{6,3}\right)}{-0,8} = 6,03 \doteq 6. \quad (4.6)$$

Náhodně jsou zvoleny $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ a hodnota kapacitoru $C_1 = 6 \mu\text{F}$, tedy parametry první větve.

Parametry dalších větví jsou dány vztahy:

$$R_k = R_1 a^{k-1}, C_k = C_1 b^{k-1}, k = 1, 2, \dots m. \quad (4.7)$$

Hodnoty korekčních parametrů se vypočítají dle:

$$R_c = R_1 \frac{1-a}{a}, C_c = C_1 \frac{b^m}{1-b}. \quad (4.8)$$

Přehledný soupis obvodových prvků je uveden v následující tabulce:

Tabulka č. 2 - Parametry prvků náhradního obvodu.

k	R_k [k Ω]	C_k [μF]
1	10000	6,0
2	2217	4,3
3	492	3,1
4	109	2,3
5	24	1,6
6	5	1,2
c	35104	3,0

Pro zvolené hodnoty R_1 a C_1 je vstupní admitance při

$$\omega_{av} = \frac{1}{R_1 C_1 (ab)^2} \left(\frac{a}{b}\right)^{0,25} = 484,7 \text{ s}^{-1} \quad (4.9)$$

středním úhlovém kmitočtu určena jako:

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}(j\omega_{av}) &= \frac{1}{R_c} + j\omega_{av} C_c + \sum_{k=1}^m \frac{j\omega_{av} C_k}{1 + j\omega_{av} R_k C_k} = \\ &= 1,4 \cdot 10^{-3} + j5,0 \cdot 10^{-3} \text{ S}. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Je zavedena veličina absolutní hodnoty sklonu modulové charakteristické impedance s_{abs} dle vztahu:

$$s_{abs} = 10^\alpha = 10^{0,822} = 6,64. \quad (4.11)$$

Vypočítaný modul impedance CPE je určen:

$$D_v = \frac{1}{|\mathbf{Y}(j\omega_{av})|} s_{abs}^{\log(\omega_{av})} = 31108 \Omega. \quad (4.12)$$

Porovnáním modulu D_v s požadovaným modulem D_p se všechny prvky zkorigují tak, aby odpovídaly modulu D_p . Rezistance se vynásobí poměrem $\frac{D_p}{D_v}$ a kapacitance se jím naopak vydělí.

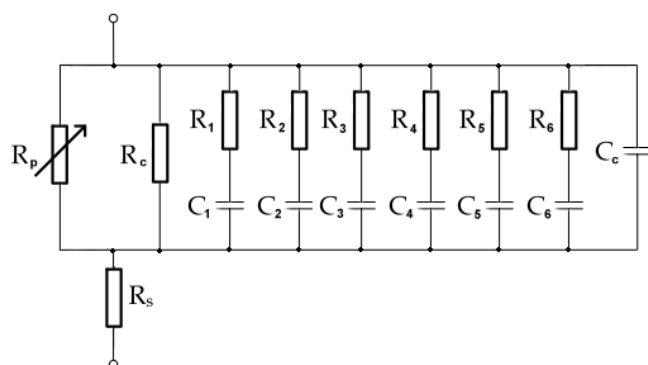
Zkorigované hodnoty prvků pak uvádí tabulka:

Tabulka č. 3 - Zkorigované parametry prvků náhradního obvodu.

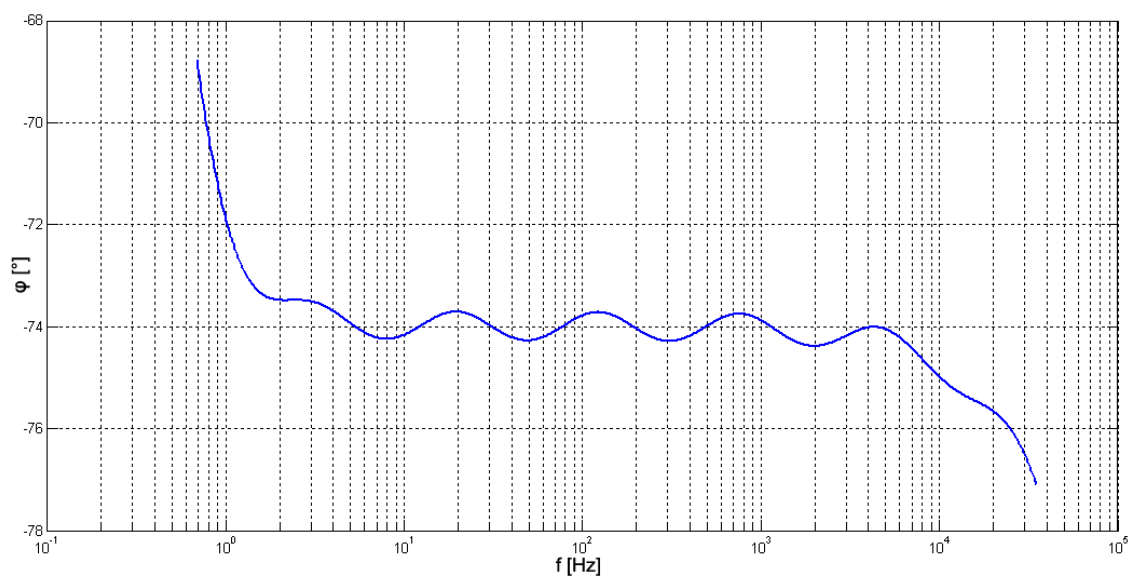
k	R_k [kΩ]	C_k [nF]
1	1924,92	31,17
2	426,77	22,49
3	94,62	16,23
4	20,98	11,72
5	4,65	8,45
6	1,03	6,10
c	6757,19	15,82

4.5 Výstup

Tato kapitola si dala za cíl vytvořit model náhradního obvodu lidské kůže. Výstupem je schéma tohoto modelu viz obr. 4.16. Jedná se o dvakrát modifikovaný Cole-Cole model. Průběh fáze je pak znázorněn v grafu na obr. 4.17. Při realizaci budou vypočítány ideální parametry. Tyto budou posléze nahrazeny hodnotami reálných součástí, čímž se původně ideální charakteristika změní.



Obrázek 4.16: Schéma modelu impedance lidské kůže. Hodnoty prvků CPE jsou uvedeny v tabulce č. 3.



Obrázek 4.17: Průběh fáze modelu v závislosti na kmitočtu modelu s vypočtenými parametry.

5 REALIZACE NÁHRADNÍHO OBVODU

V této kapitole bude popsána výroba náhradního obvodu lidské kůže.

5.1 Simulace CPE

Před výrobou obvodu je nutno (vzhledem k reálným součástkám a předpokládanému použití sériových zapojení rezistorů, resp. paralelních zapojení kapacitorů) hledat kompromis mezi přesností cíleného parametru a složitostí obvodu. V následující tabulce se nachází vedle již zmíněných ideálních hodnot tzv. parametry jednoduchého obvodu. Zde se snažíme obvod zjednodušit na jednu součástku pro parametr. V posledním sloupci jsou hodnoty součástek tzv. složitého obvodu s maximálně třemi součástkami na parametr. Tento limit byl zvolen jako horní hranice konstrukční složitosti.

Tabulka č. 4 - Hodnoty jednotlivých prvků před simulací.

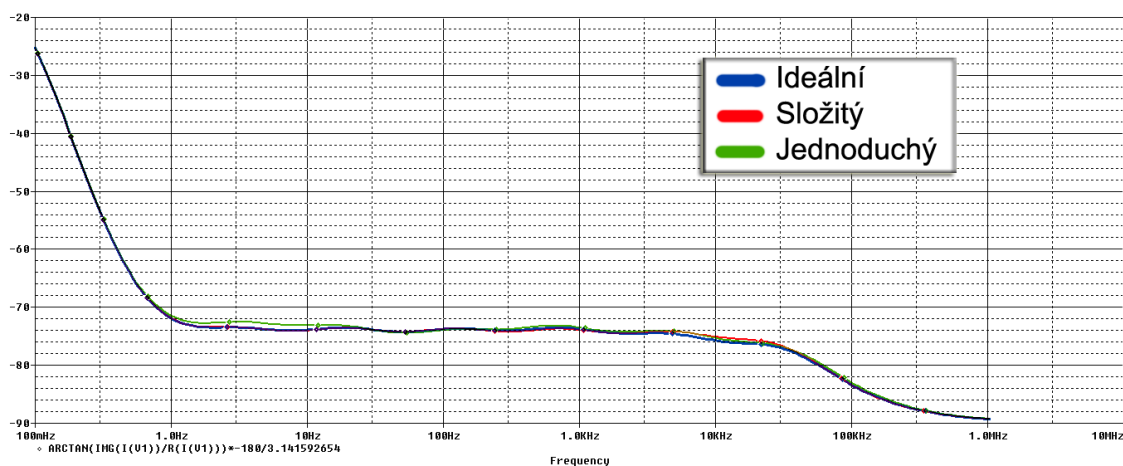
k	Ideální		Jednoduché		Složitý							
	R_k [k Ω]	C_k [nF]	R_k [k Ω]	C_k [nF]	R_k [k Ω]			$\sum R_k$	C_k [nF]			$\sum C_k$
1	1924,92	31,17	1800,0	33,0	1800,0	120,00	4,70	1924,70	22,0	8,2	1,0	31,2
2	426,77	22,49	470,0	22,0	390,0	33,00	3,90	426,90	1,5	18,0	3,3	22,8
3	94,62	16,23	100,0	15,0	82,0	12,00	0,68	94,68	1,2	15,0		16,2
4	20,98	11,72	22,0	12,0	18,0	2,70	0,27	20,97	1,8	10,0		11,8
5	4,65	8,45	4,7	8,2	3,9	0,68	0,08	4,66	5,6	2,7		8,3
6	1,03	6,10	1,0	5,6	1,0	0,03		1,03	2,2	3,9		6,1
c	6755,19	15,82	6800,0	15,0	5600,0	1000,00	150,00	6750,00	12,0	3,9		15,9

Simulace obvodu proběhla v freeware aplikaci PSpice 9.1 [32]. Výsledek simulace tří obvodů je zaznamenán na obr. 5.1, pro upřesnění však bylo použito detailu 5.2. V tomto grafu lze snadno shledat, že jednoduchý obvod se od reálného liší nejvíce na počátku požadovaného spektrálního rozsahu o cca 1 dB.

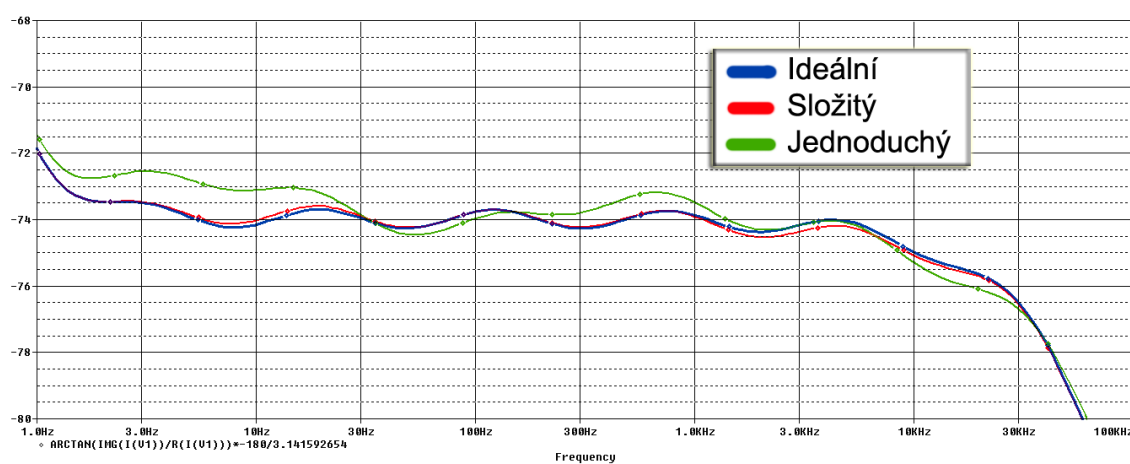
S důrazem na kompaktnost výsledného plošného spoje byla zvolena střední cesta, a to rozšíření nedostatečných větví CPE jednoduchého obvodu. V následující tabulce jsou uvedeny konečné a použité prvky výsledného obvodu CPE ve srovnání s ideálně namodelovanými hodnotami a jednoduchým obvodem a na obr. 5.3. Pro konstrukci bude tedy použito maximálně dvou součástek na parametr prvku obvodu.

Tabulka č. 5 - Výsledné hodnoty prvků obvodu CPE.

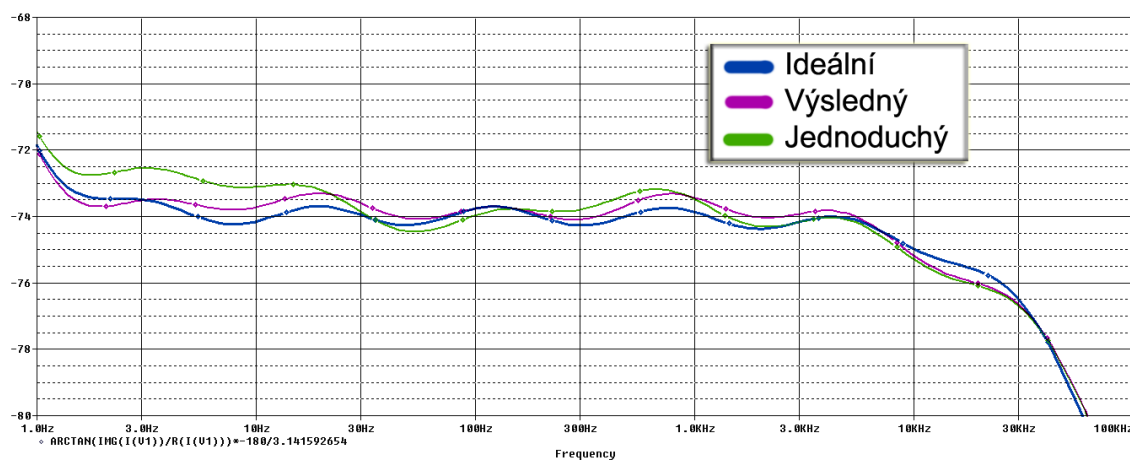
	Ideální		Jednoduché		Výsledné					
k	R_k [kΩ]	C_k [nF]	R_k [kΩ]	C_k [nF]	R_k [kΩ]		$\sum R_k$	C_k [nF]	$\sum C_k$	
1	1924,92	31,17	1800,0	33,0	1800,0		1800,0	22,0	8,2	30,2
2	426,77	22,49	470,0	22,0	390,0	33,0	423,0	22,0		22,0
3	94,62	16,23	100,0	15,0	100,0		100,0	15,0		15,0
4	20,98	11,72	22,0	12,0	18,0	2,7	20,7	10,0	1,8	11,8
5	4,65	8,45	4,7	8,2	4,7		4,7	8,2		8,2
6	1,03	6,10	1,0	5,6	1,0		1,0	5,6		5,6
c	6755,19	15,82	6800,0	15,0	6800,0		6800,0	15,0		15,0



Obrázek 5.1: Simulace tří druhů obvodu.



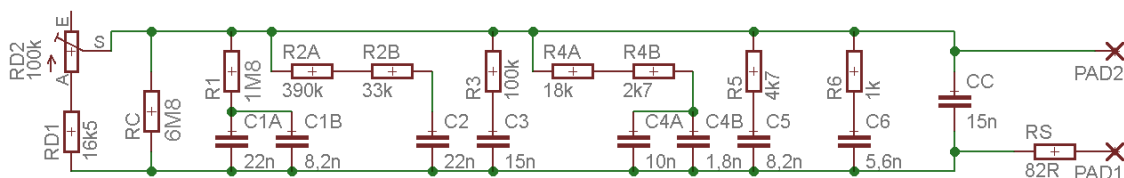
Obrázek 5.2: Simulace tří druhů obvodu – detail.



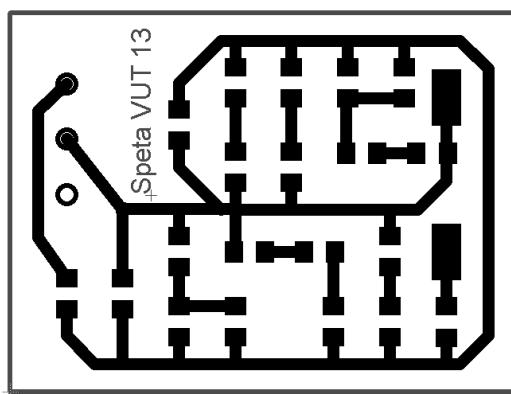
Obrázek 5.3: Simulace výsledného obvodu CPE.

5.2 Návrh náhradního obvodu

Dalším krokem před samotnou výrobou plošného spoje je jeho návrh vycházející z ideálního modelu z obr. 4.16 osazeného součástkami z předchozí části 5.1. Obvod byl navržen v aplikaci Eagle [33]. Pro označení prvků obvodu byly použity katalogové názvy odvozené z hodnot prvků z předchozí části textu. Výsledný návrh a předloha pro leptání plošného spoje viz 5.4 resp. 5.5.



Obrázek 5.4: Navržený obvod v programu Eagle.



Obrázek 5.5: Zobrazení vodivých cest DPS.

5.3 Výroba přípravku

Na základě pozitivní předlohy byla vyleptána deska plošných spojů o rozměrech 3,5x4,5 cm. Jako základní materiál posloužil FR4. Na osazovacím přístroji byly následně na pájecí pastu umístěny SMD součástky v pouzdrech typu 1206. Celá DPS byla finalizována technologií reflow. Výsledná deska byla umístěna spolu s konektory a regulačním potenciometrem do krabičky o rozměrech 72x48x22 mm. Konečný výrobek v podobě měřicího přípravku je zobrazen na obr. 5.6 a použité součástky jsou uvedeny v tabulce č. 6.

Tabulka č. 6 - Seznam součástek.

Označení	Typ součástky	pouzdro	hodnota	tolerance
RC	SMD rezistor 0.25 W TK200 E24	1206	6M8	5%
RP1	SMD rezistor 0.25 W TK200 E24	1206	16k0	5%
R1	SMD rezistor 0.25 W TK200 E24	1206	1M8	5%
R2A	SMD rezistor 0.25 W TK200 E24	1206	390k	5%
R2B	SMD rezistor 0.25 W TK200 E24	1206	33k	5%
R3	SMD rezistor 0.25 W TK200 E24	1206	100k	5%
R4A	SMD rezistor 0.25 W TK200 E24	1206	18k	5%
R4B	SMD rezistor 0.25 W TK200 E24	1206	2k7	5%
R5	SMD rezistor 0.25 W TK200 E24	1206	4k7	5%
R6	SMD rezistor 0.25 W TK200 E24	1206	1k0	5%
RS	SMD rezistor 0.25 W TK200 E24	1206	82R	5%
C1A	Kondenzátor keramický X7R 50 V	1206	22n	10%
C1B	Kondenzátor keramický X7R 50 V	1206	8,2n	10%
C2	Kondenzátor keramický X7R 50 V	1206	22n	10%
C4A	Kondenzátor keramický X7R 50 V	1206	10n	10%
C4B	Kondenzátor keramický X7R 50 V	1206	1,8n	10%
C5	Kondenzátor keramický X7R 50 V	1206	8,2n	10%
C6	Kondenzátor keramický X7R 50 V	1206	5,6n	10%
CC	Kondenzátor keramický X7R 50 V	1206	15n	10%
RP2	Potenciometr lineární mono 0,1 W	klasik	100k	20%
	Konektory banánek zdířka 2x		2mm	
	Přístrojová krabička 72x48x22 mm			



Obrázek 5.6: Výsledný měřicí přípravek.

5.4 Kontrola měření

Na závěr výrobního procesu bylo potřeba zkontrolovat funkčnost měřicího přípravku. Ověření tak proběhlo opět na spektroskopu BioLogic VMP3 ve stejném nastavení jako při získávání zdrojových dat pro výpočet modelu kůže a to:

- PEIS.
- Multisinusový mód.
- Potenciál $E = 0$ V.
- Rozsah měření $f_i = 500$ kHz až $f_f = 0,5$ Hz.
- Skenování třiceti bodů na dekádu $N_d = 30$.
- Amplituda sinusového signálu $V_a = 20$ mV.
- Čekat $p_w = 0,1$ periody před změnou frekvence.
- Každý bod byl proměřen třikrát $N_a = 3$.

Prvním výstupem validace je srovnání průběhů impedance modelu kůže získaného po interpretaci statických dat v kap. 4.2.2 s právě naměřeným průběhem na přípravku. Na obr. 5.7 lze pozorovat minimální odchylku mezi modelem a realizovaným obvodem. Tato odchylka je způsobena zejména těmito momenty:

- Spektrometr při měření automaticky přepíná dekádu. Při tomto přepnutí dochází ke znatelnému ovlivnění charakteristiky.

- CPE je ideální prvek, použitím jakéhokoliv převodu na realizovatelný model dojde ke zkreslení.
- Simulovaný obvod nelze realizovat dokonale přesně, použitím reálných hodnot součástek dosáhneme dalšího odklonu od ideálu.
- Reálné součástky mají toleranci parametrů 5-20%.
- Paralelní kombinace rezistancí R_p a R_c . Tento problém vychází z toho, že Coleův model s CPE nepočítá s reálným prvkem vymodelovaným několika větvemi rezistancí a kapacit. Zpětným pohledem na schéma obvodu na obr. 5.4 si lze uvědomit, že čím větší R_p bude, tím víc bude tento parametr ovlivňovat R_c . V důsledku tak toto svázání ovlivňuje linearitu potenciometru, kterým se reguluje obvod. Z výchozího vztahu [17]:

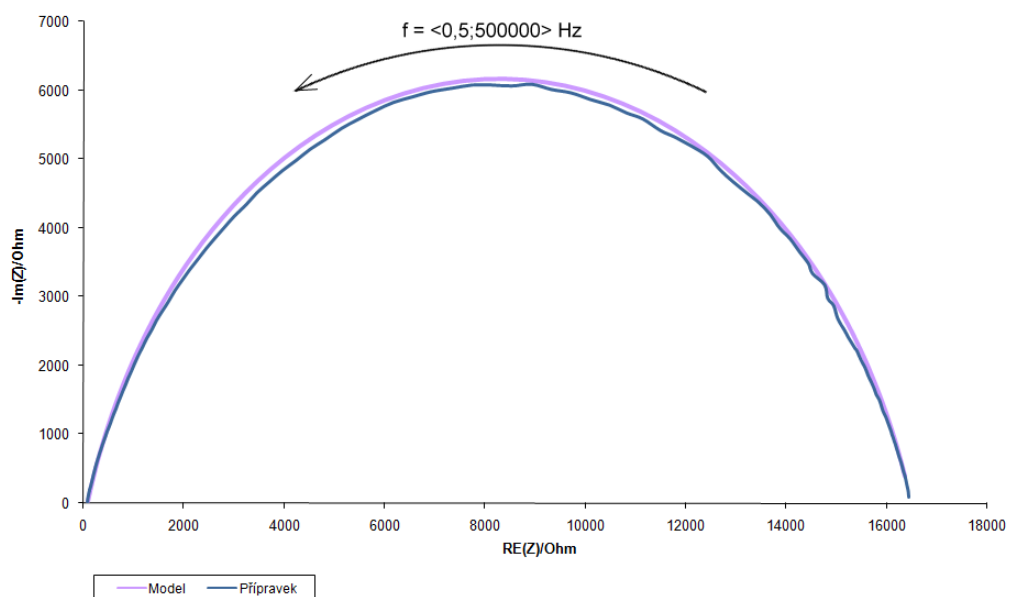
$$R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}, \quad (5.1)$$

je získána tabulka zkreslení paralelní kombinací.

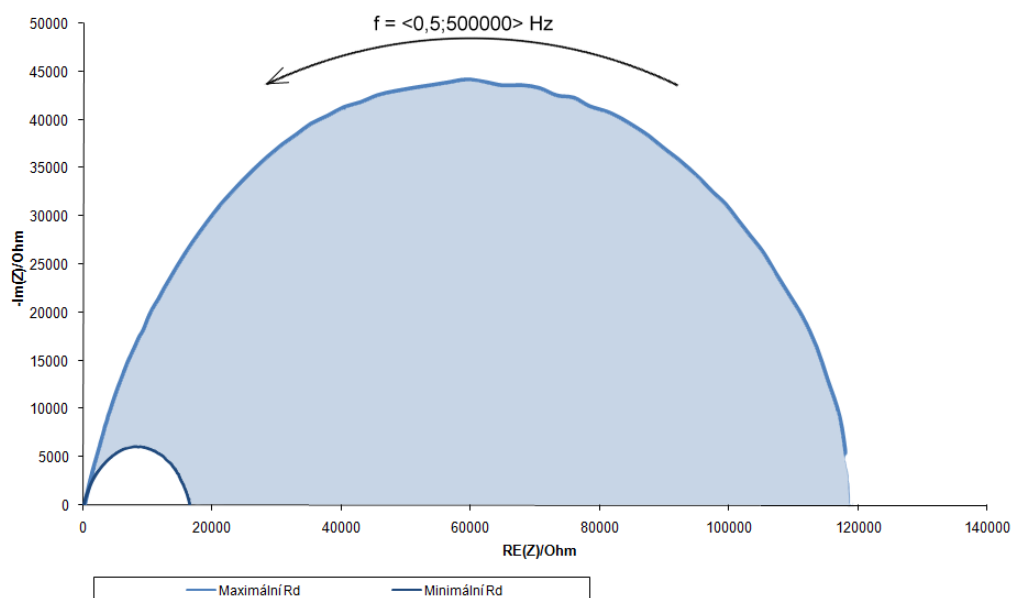
Tabulka č. 7 - Tabulka ovlivnění paralelní kombinací.

$R_p[\text{k}\Omega]$	$R_c[\text{M}\Omega]$	$R[\text{k}\Omega]$	$\delta R[\%]$
16,5	6,8	16,46	0,24
36,5		36,31	0,53
56,5		56,03	0,82
76,5		75,65	1,11
96,5		95,15	1,40
116,5		114,54	1,68

Pro jistotu byl naměřen také rozsah impedance přípravku (obr. 5.8). Tento graf zobrazuje plochu, uvnitř které se při regulaci R_p pomocí potenciometru nacházejí jednotlivé průběhy impedancí závislé právě na tomto parametru, viz kap. 4.3.1.



Obrázek 5.7: Průběhy impedance ideálního modelu (kap. 4.2.2) a přípravku.



Obrázek 5.8: Rozsah možných změn impedance přípravku.

6 DIADENS – REALITA

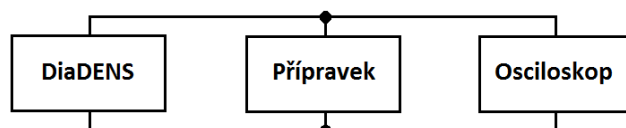
V této kapitole se budeme zabývat reálnými elektrickými parametry přístroje DiaDENS naměřenými pomocí vyrobeného přípravku ve srovnání s výrobcem deklarovanými hodnotami. Zhotovený přípravek je použit jako zátěž simulující lidskou kůži.

6.1 Měřicí pracoviště

K proměření charakteristik dynamické elektroneurostimulace byly použity následující zařízení:

- **DiaDENS-PC** – S/N 9444-002-35266303-2005, rok výroby 2006, napájen 9V baterií.
- Přípravek náhradního obvodu kůže vyrobený pro tuto diplomovou práci.
- **Agilent DSO-X 2012A** – osciloskop se dvěma kanály, šířkou pásma 100 MHz a rozlišením 1 GSa/s.
- Sonda s krokosvorkami.

Schéma zapojení měřicího pracoviště je zobrazeno na obr. 6.1. Měření proběhlo při teplotě okolí 28 °C a relativní vlhkost 60–70 %.



Obrázek 6.1: Blokové schéma zapojení pracoviště.

6.2 Naměřené parametry

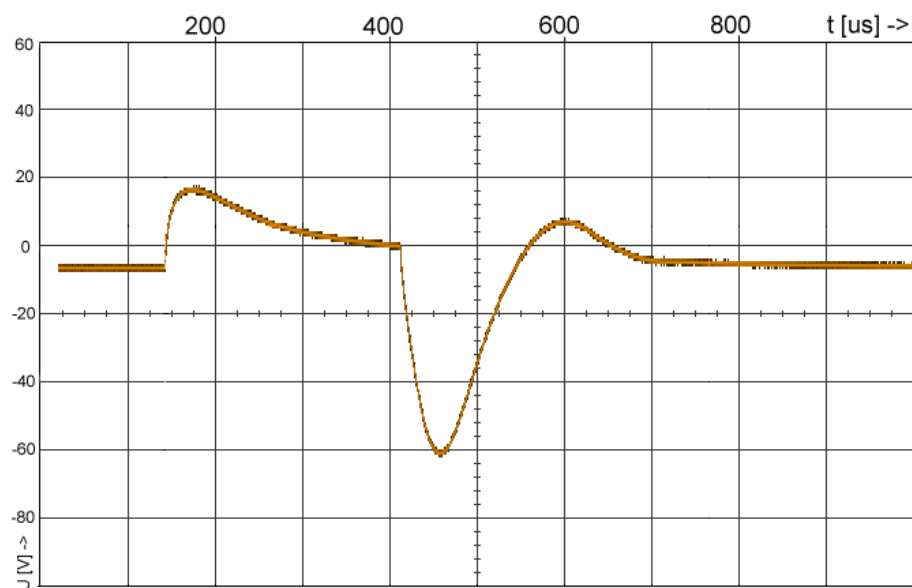
6.2.1 Impulz

Přístroj reguluje intenzitu působení v rozsahu 1–99 (dále jen síla). Měření proběhlo pro celý rozsah a bylo zaměřeno na zjištění změn amplitudy impulzu (peak-to-peak) a dobu trvání signálu. Tvar signálu o síle 99 (amplituda 80 V) je graficky zobrazen na obr. 6.2, doba trvání tohoto impulzu je 1248 μ s. Vidíme tři znatelné půlkmity. Impulz se v rozsahu přístroje mění amplitudově i časově. Srovnání průběhů nalezneme v tabulce č. 7 a grafech 6.3 resp. 6.4. Je důležité poznamenat, že účinná délka

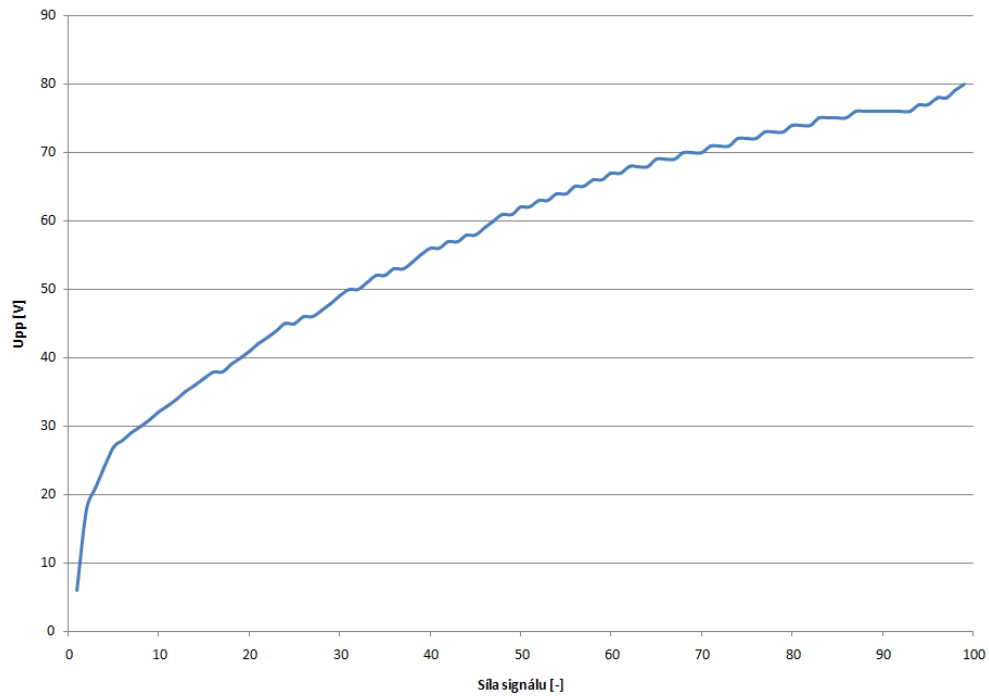
impulzu ($710\ \mu\text{s}$) se nemění, dodatečný čas je přístrojem využit pravděpodobně pro vybíjení kondenzátoru, který zvyšuje napětí v obvodu, viz obr. 6.5. Se zvyšující se silou, se zvyšuje amplituda a prodlužuje délka celého impulzu, nikoliv účinné složky. Zajímavý je průběh při síle přístroje 1, viz obr. 6.6. Z tohoto průběhu pozorováním a srovnáním s průběhy s vyšší intenzitou usuzujeme, že účinná indikace nastává až při síle 13, kdy délka impulzu přesáhne neměnnou délku účinného impulzu ($710\ \mu\text{s}$), viz také tabulka č. 7.

Tabulka č. 7 - Naměřené hodnoty amplitudy a délce impulzu pro rozsah 1–99

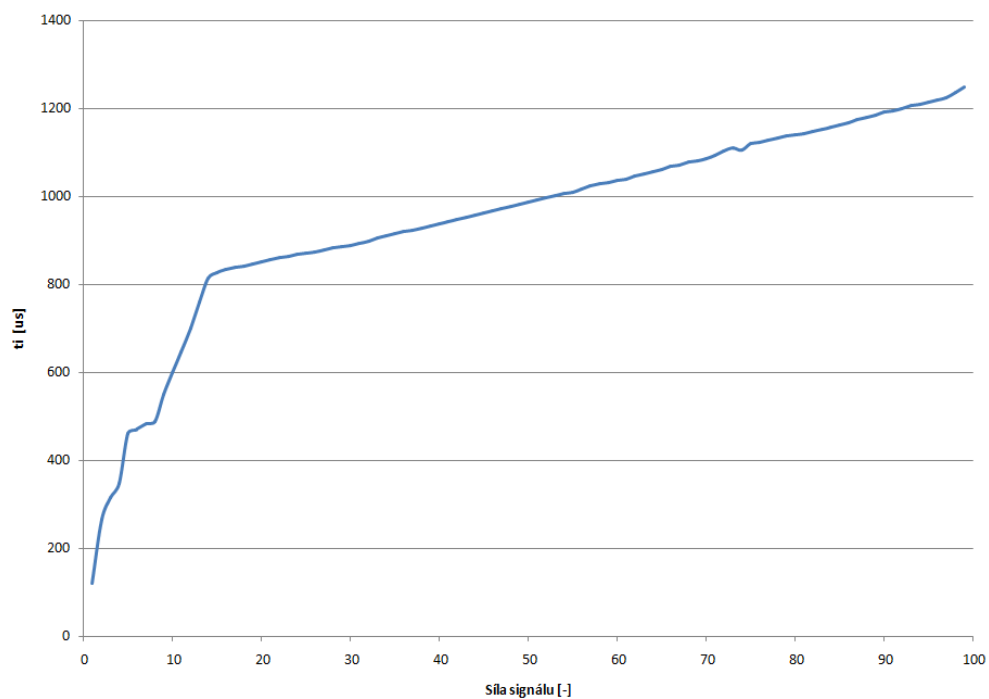
síla [-]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Upp [V]	6	18	21	24	27	28	29	30	31	32
ti [μs]	120	266	316	348	462	471	484	490	550	600
síla [-]	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Upp [V]	33	34	35	36	37	38	38	39	40	41
ti [μs]	648	702	760	815	828	834	839	843	848	852
síla [-]	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Upp [V]	42	43	44	45	45	46	46	47	48	49
ti [μs]	857	861	865	869	872	875	880	884	887	890
síla [-]	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Upp [V]	50	50	51	52	52	53	53	54	55	56
ti [μs]	894	899	907	911	916	920	924	929	933	938
síla [-]	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Upp [V]	56	57	57	58	58	59	60	61	61	62
ti [μs]	942	948	953	959	964	968	972	977	982	988
síla [-]	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Upp [V]	62	63	63	64	64	65	65	66	66	67
ti [μs]	993	997	1002	1007	1010	1017	1024	1029	1033	1036
síla [-]	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
Upp [V]	67	68	68	68	69	69	69	70	70	70
ti [μs]	1040	1046	1051	1057	1062	1068	1072	1078	1082	1086
síla [-]	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
Upp [V]	71	71	71	72	72	72	73	73	73	74
ti [μs]	1094	1104	1110	1106	1120	1124	1129	1134	1137	1140
síla [-]	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
Upp [V]	74	74	75	75	75	75	76	76	76	76
ti [μs]	1143	1149	1153	1157	1164	1168	1175	1181	1186	1192
síla [-]	91	92	93	94	95	96	97	98	99	
Upp [V]	76	76	76	77	77	78	78	79	80	
ti [μs]	1195	1201	1206	1210	1214	1219	1225	1236	1248	



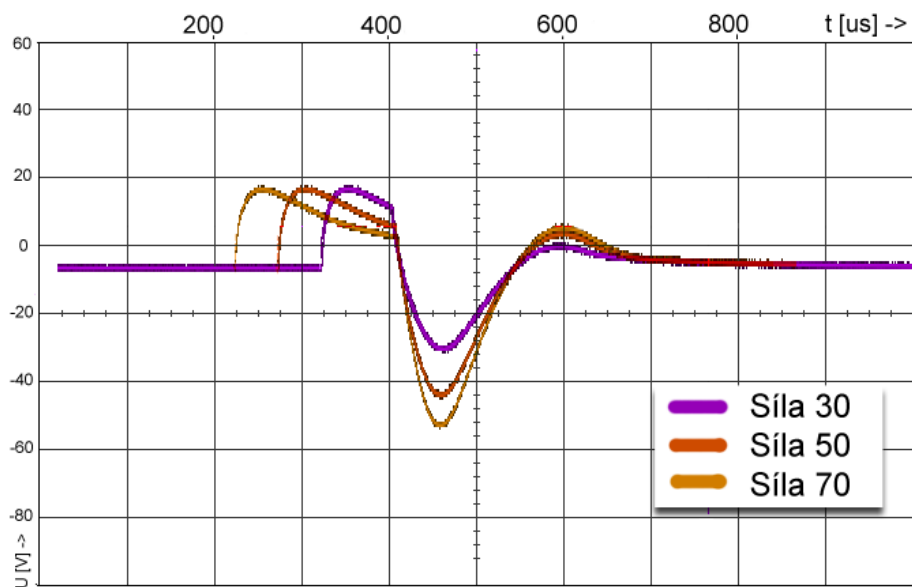
Obrázek 6.2: Průběh impulsu o „síle“ 99 a frekvenci 77 Hz.



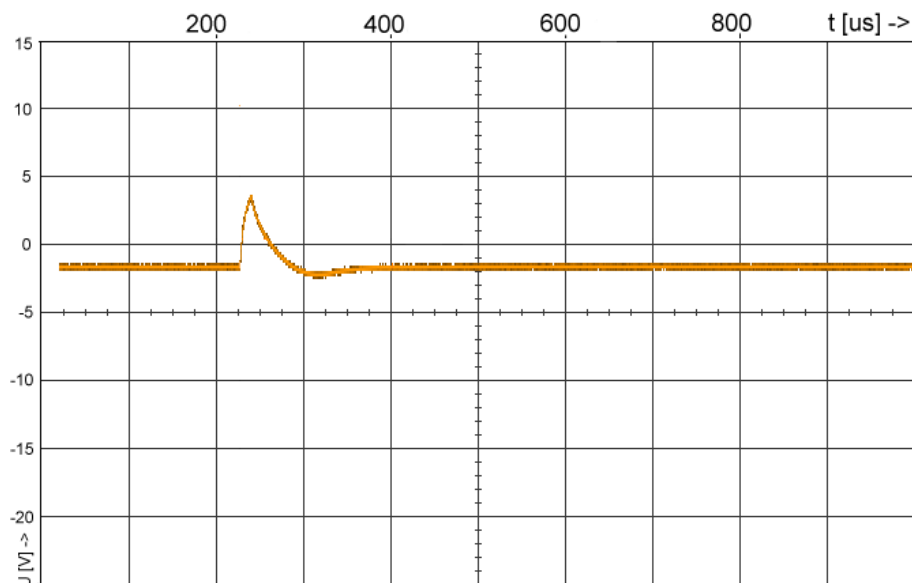
Obrázek 6.3: Závislost amplitudy na síle signálu.



Obrázek 6.4: Závislost délky impulzu na síle signálu.



Obrázek 6.5: Změna délky impulzu.

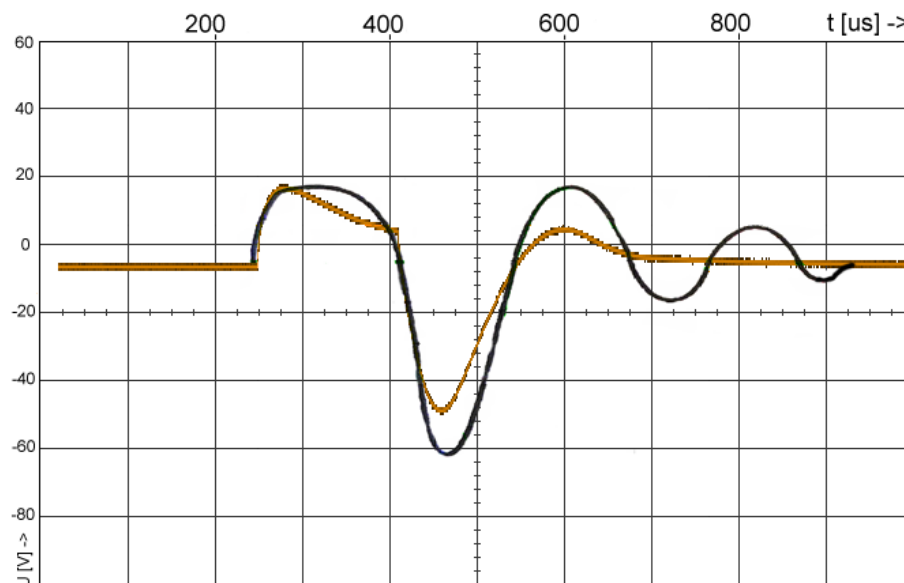


Obrázek 6.6: Impulz o „síle“ 1 při 77 Hz.

Závěrem této sekce zbývá srovnat naměřené průběhy a parametry s deklarovanými hodnotami výrobcem [11]. Zjišťujeme, že ačkoliv maximální amplituda nepřekročila maximální hodnotu napětí uvedenou v manuálu, délka účinného impulsu ano. Nejvíce se však liší samotný průběh signálu. Výrobcem zveřejněný průběh nekoresponduje s naměřenými daty. Je otázkou, zda jde o grafické zjednodušení, marketingovou nadsázku, nebo o vadné zařízení. Další otázkou je, zda má tento fakt vliv na účinnost elektroneurostimulace, viz obr. 6.7.

Tabulka č. 8 - Srovnání hodnot deklarovaných s naměřenými.

	Naměřená data	Deklarovaná data
Doba trvání impulsu	$1248 \mu s$	$500 \pm 70 \mu s$
Maximální amplituda impulsu	80 V	$380 \pm 80 V$



Obrázek 6.7: Srovnání naměřeného impulsu s deklarovaným (černě).

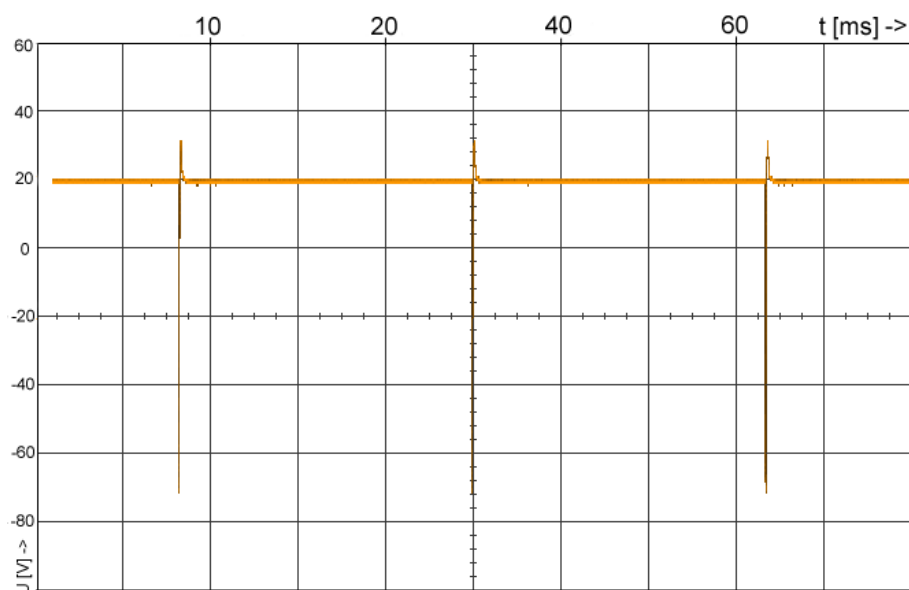
6.2.2 Frekvence

V části 3.2.1 bylo pojednáno o rozličných pracovních režimech přístroje DiaDENS-PC a zejména o rozsahu účinných frekvencí. Z popisu však nebylo zřejmé, zda se změnou frekvence mění tvar impulsu nebo, jedná-li o frekvenční modulaci, či jinou formu. Při pohledu na dvě příkladná měření pro režim 60 Hz (obr. 6.8) a pro 200 Hz (obr. 6.9) můžeme s jistotou říct, že se jedná o změnu impulzové frekvence, tedy změnu periody vysílání účinného signálu.

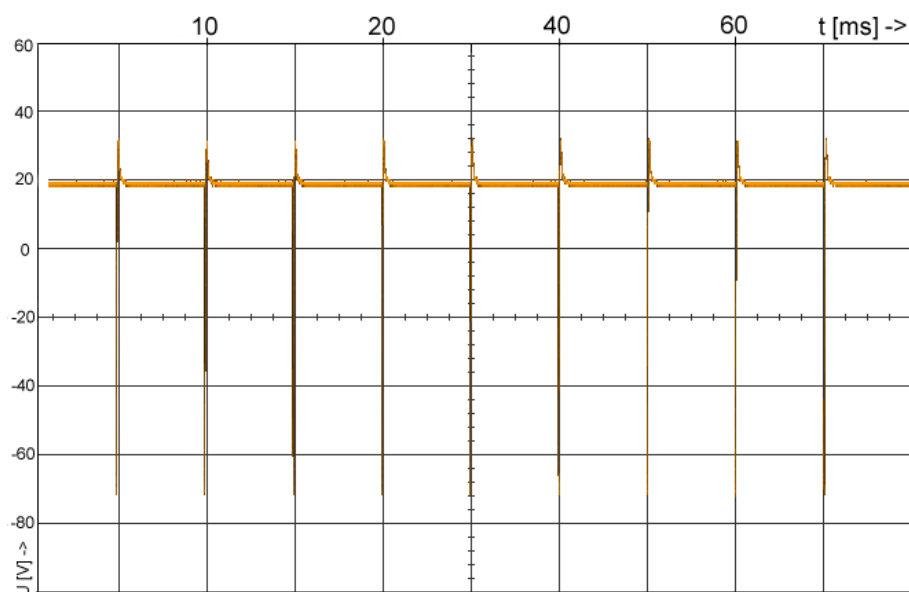
Tabulka č. 9 - Srovnání hodnot deklarovaných s naměřenými.

Režim	F10	F20	F60	F77	F140	F200
Deklarovaná frkv. [Hz]	10 ± 2	20 ± 2	60 ± 2	77 ± 2	140 ± 5	200 ± 5
Naměřená frkv. [Hz]	9,86	19,95	59,75	76,65	139,29	199,08
Perioda [ms]	101,42	50,13	16,74	13,05	7,18	5,02

Z tabulky č. 9 lze usoudit, že na rozdíl od deklarovaných parametrů impulsu zde zařízení, co se týká frekvenční stránky, pracuje zcela správně a frekvence se pohybuje v přípustné toleranci udané výrobcem. Byly proměřeny i frekvence v intervalu $\langle 1 - 9 \rangle$ a naměřená odchylka nebyla větší než 0,02 Hz.



Obrázek 6.8: Průběh v režimu 60 Hz.



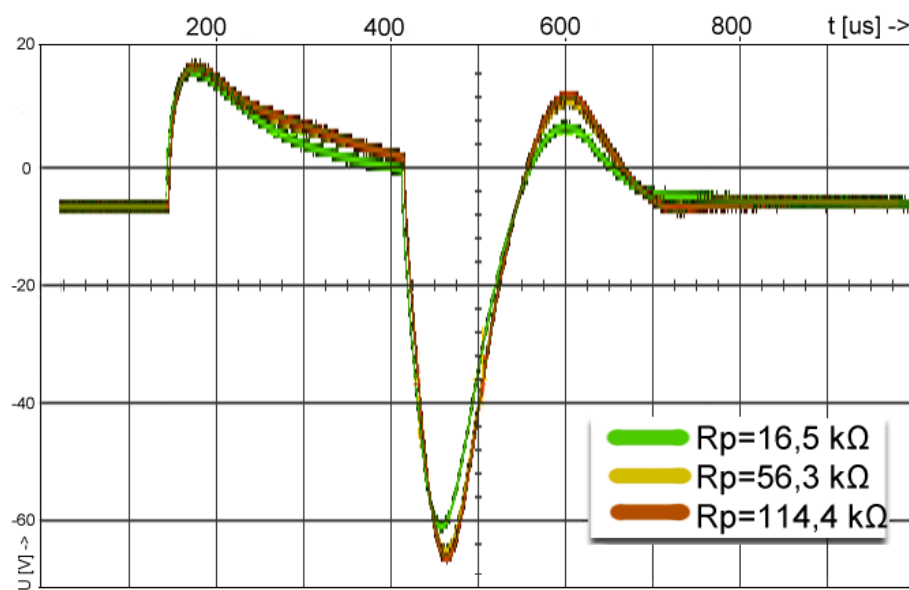
Obrázek 6.9: Průběh v režimu 200 Hz.

6.2.3 Vliv modelu kůže

Předpokladem této práce bylo, že zařízení DiaDENS je konstruováno tak, aby dokázalo reagovat na měnící se parametry kůže během terapie a byl tak účinek po celou dobu působení stejný. Tento předpoklad byl potvrzen měřením viz obr. 6.10 a tabulka č. 10. Při zvýšené zátěži (tedy po určité době působení elektrického signálu na kůži) dojde k zesílení signálu, délka signálu je neměnná.

Tabulka č. 10 - Změna amplitudy při změně zátěže.

$R_p[\text{k}\Omega]$	16,46	56,03	75,65	95,15	114,54
$U_{pp} [\text{V}]$	80	82	84	85	86



Obrázek 6.10: Srovnání průběhů při různé zátěži modelu kůže.

7 ZÁVĚR

Metoda dynamické elektroneurostimulace je moderní metodou diagnostiky a léčby chorob a potíží organismu. Je založena na poznatcích a tisíciletých zkušenostech s tradiční akupunkturou a akupresurní léčbou pocházející z Číny. Tyto pak spojuje s moderním výzkumem lidského nervového systému a působení různých elektrických signálů na biologické zóny a body na kůži.

V principu jde o působení na elektrické signály putující nervovou soustavou do mozku. Pokud totiž vnějšími vlivy životního prostředí a stresu dojde k jejich zkreslení, mozek může neadekvátně reagovat, a stav tkání tak zhoršit. DENS metoda stimuluje signály tak, aby mozek na svém výstupu posílal příkazy k prokrvení buněk. Prokrvením se zlepšuje funkčnost tkání, orgánů a odvádí se volné radikály.

Světovým lídrem na poli DENS je mezinárodní společnost DENAS MS. Své kořeny má v Rusku, kde třicet let metodiku testovala. Aparáty mají malou hmotnost, jsou přenosné a nabízejí několik funkcí. Klinicky byly dokázány účinky na funkčnost orgánů, tkání i na psychiku člověka. Metoda se spolu s zařízeními postupně dostává do celého světa a získává osvědčení povolující použití při klinické léčbě pacientů.

Praktickým cílem této práce byla realizace modelu náhradního obvodu impedance lidské kůže. Kůži lze z elektrotechnického hlediska modelovat několika způsoby. Modelování započalo od nejjednoduššího modelu s jedním prvkem, a to odporem. V současnosti se nejvíce používají tříprvkové modely Cole-Cole a None-Cole obsahující prvek s konstantní fází CPE. Trend směřuje k úpravě těchto modelů na základě rozšiřování poznatků z oblastí fyziky, chemie i biologie.

Experiment proběhl na potenciostatu BioLogic pomocí speciálně zhotoveného přípravku s elektrodou podobnou vestavěné elektrodě přístroje DiaDENS. Na základě měření na několika subjektech byl odvozen upravený Cole-Cole model, jehož parametry byly zjištěny statistickou analýzou dat. Poměrně překvapivým závěrem tohoto snažení bylo zjištění, že působením přístroje DiaDENS v čase, se mění pouze paralelní rezistivita v tříprvkovém modelu kůže, a to lineárně. Model tak lze realizovat nejen jako statický, ale pomocí potenciometru lze i simulovat adaptaci kůže na působení elektrického signálu.

Důležitým momentem realizace modelu byl výpočet náhradního obvodu CPE [16]. CPE byl vymodelován pomocí šesti paralelních kombinací $R_k C_k$ ($k = 1, \dots, 6$) a dvěma korekčními prvky R_c a C_c .

Výsledné hodnoty prvků náhradního obvodu lidské kůže byly následně upraveny na základě parametrů dostupných reálných součástek. Veškeré změny hodnot byly simulovány v aplikaci PSpice [32], aby nedošlo k příliš velkému odklonu od ideálního simulovaného průběhu charakteristik. DPS byla osazena obvodem složeným z SMD součástek pomocí povrchové montáže a vložena do praktické přístrojové krabice.

Odchylka charakteristiky přípravku v porovnání s ideálním průběhem byla zanedbatelná, způsobená matematickými zjednodušeními a použitou procesní technologií.

Přístroj DiaDENS-PC byl podroben důkladnému měření parametrů. Zhotovený obvod byl použit jako zátěž simulující lidskou kůži. Popisem účinného impulzu docházíme k závěru, že výrobcem deklarované parametry (délka a průběh impulzu) sice nejsou dodrženy, ale předpokládané elektrické vlastnosti, zejména dynamika stimulace, byly potvrzeny. Zařízení v čase, resp. zvyšováním zátěže, intenzitu působení zesiluje (peak-to-peak amplitudu napětí), čímž byl potvrzen předpoklad dynamické stimulace. Na druhou stranu nelze celou metodu na základě jednoho zařízení generalizovat.

REFERENCE

- [1] VRÁNA, V.: *Elektrické vlastnosti organismů*. PRAHA, 1974. 234 s.
- [2] YAMAMOTO, Y.: *Influences of the Skin Impedance as the Interface in Bioelectric Potential Measurement*. Memoirs of the School of Engineering, Okayama University, roč. 15, č. 1. 1980.
- [3] COLE, K. S.: *Electric impedance of suspension of spheres*. The Journal of General Physiology, č. 12, roč. 1, strany 29-36. 1928.
- [4] BARNETT, A.: *The phase angle of normal human skin*. The Journal of Physiology. 1938.
- [5] DORGAN, S. J., REILLY, R. B.: *A model for human skin impedance during surface functional neuromuscular stimulation*. IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, č. 7, strany 341-348. 1999.
- [6] GRIMMES, M. O.: *Bioimpedance and bioelectricity basic*. Academic Press, New York, 2000.
- [7] VRÁNA, J.: *Stručné základy klasické akupunktury*. OLOMOUC, 1982. 85 s. Výuková skripta.
- [8] PEPLČÍK, J.: *Akupresura*. PRAHA, CKD, 1985. 63 s. Metodický materiál.
- [9] HEŘMAN, P.: *Biosignály z pohledu biofyziky*. PRAHA, 2006. 63 s. ISBN 80-902899-7-5.
- [10] Kolektiv.: *Manuál dynamické elektroneurostimulace DiaDENS*. Jekatěrinburg, Rusko, 2006. 240 s. Brožura.
- [11] Kolektiv.: *DiaDENS-PC - Návod k obsluze*. Německo, 2005. 240 s. Brožura.
- [12] MÍKA, P.: *Dynamická elektroneurostimulace*. Brno, VUT, 2010. 63 s. Bakalářská práce.
- [13] BRUDIK, V.: *Psychogalvanický reflex a jeho detekce*. Brno, VUT, 2008. 39 s. Bakalářská práce.
- [14] ZVÁROVÁ, J.: *Základy statistiky pro biomedicínské obory*. PRAHA, Karolinum, 1999. 220 s. ISBN 8071847861.
- [15] PAVLÍK, T., DUŠEK, L.: *Biostatistika*. BRNO, CERM, 2012. 132 s. ISBN 9788072047826.
- [16] VALSA, J., DVOŘÁK, P., FRIEDL, M.: *Network Model of the CPE*. RADIO-ENGINEERING, roč. 20, č. 3, strany 619-627.

[17] BRANČÍK, L.: *Elektrotechnika 1*. Brno, VUT, 2004. 135 s. ISBN: 8021426071.

Internetové články:

[18] FIALA, R. a kol.: *Anatomie lidské kůže* [online], 2012 [cit. 18. 3. 2012]
Dostupné z URL: <<http://www.hojeni-ran.cz>>.

[19] RUWANSIRI, W. A. T.: *Impedance Model for Human Skin and Blood Glucose Spectroscopy* [online], 2011 [cit. 18. 3. 2012]
Dostupné z URL: <<http://necec.engr.mun.ca/ocs2011/>>.

[20] GRIMMES, S., MARTINSEN, G.: *Impedance Model for Human Skin and Blood Glucose Spectroscopy* [online], 2005 [cit. 19. 3. 2012]
Dostupné z URL: <<http://www.mn.uio.no>>.

[21] VARIOUS: *DENS – Brief historical note* [online], 2008, poslední aktualizace 10. 2. 2011 [cit. 5. 12. 2011]
Dostupné z URL: <<http://www.denasmc.com/history.html>>.

[22] VARIOUS: *Rienhard Voll* [online], 2008, poslední aktualizace 22. 8. 2008 [cit. 5. 12. 2011]
Dostupné z URL: <<http://www.biomeridian.com>>.

[23] VARIOUS: *Historie Denasterapie* [online], 2008, poslední aktualizace 16. 5. 2011 [cit. 5. 12. 2011]
Dostupné z URL: <<http://www.denascz.cz/>>.

[24] VARIOUS: *BASIC PRINCIPLES OF DENAS-THERAPY* [online], 2008, poslední aktualizace 5. 1. 2011 [cit. 5. 12. 2011]
Dostupné z URL: <<http://www.denasmc.com/therapy.html>>.

[25] VARIOUS: *Indications to Dens Therapy* [online], 2008, poslední aktualizace 24. 6. 2011 [cit. 5. 12. 2011]
Dostupné z URL: <<http://www.denasmc.com/therapy.html>>.

[26] VARIOUS: *DENS – ISO 9001* [online], 2008, poslední aktualizace 25. 11. 2011 [cit. 5. 12. 2011]
Dostupné z URL: <<http://www.itczlin.cz/iso-9001.php>>.

[27] ROSSEL, J. a kol.: *Skin Impedance From 1 Hz to 1 MHz* [online], 1988 [cit. 18. 3. 2012]
Dostupné z URL: <<http://upcommons.upc.edu>>.

WWW odkazy:

- [28] *Stavba kůže* [online]. 2007 [cit. 18. 3. 2012].
Dostupné z URL: <<http://www.gymhol.cz/projekt/biologie>>.
- [29] *DENAS MS Corporation* [online]. 2003. 12. 11. 2008 [cit. 10. 12. 2011].
Dostupné z URL: <<http://denasms.com/>>.
- [30] *BioLogic VMP3* [online]. 2011 [cit. 22. 3. 2012].
Dostupné z URL: <<http://www.bio-logic.info/potentiostat/vmp3.html>>.
- [31] *EC-LAB* [online]. 2011 [cit. 22. 3. 2012].
Dostupné z URL: <<http://www.bio-logic.info/potentiostat/eclab.html>>.
- [32] *PSpice* [online]. 2013 [cit. 18. 3. 2013].
Dostupné z URL: <<http://www.cadence.com/>>.
- [33] *Eagle* [online]. 2013 [cit. 18. 3. 2013].
Dostupné z URL: <<http://www.cadsoftusa.com/>>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

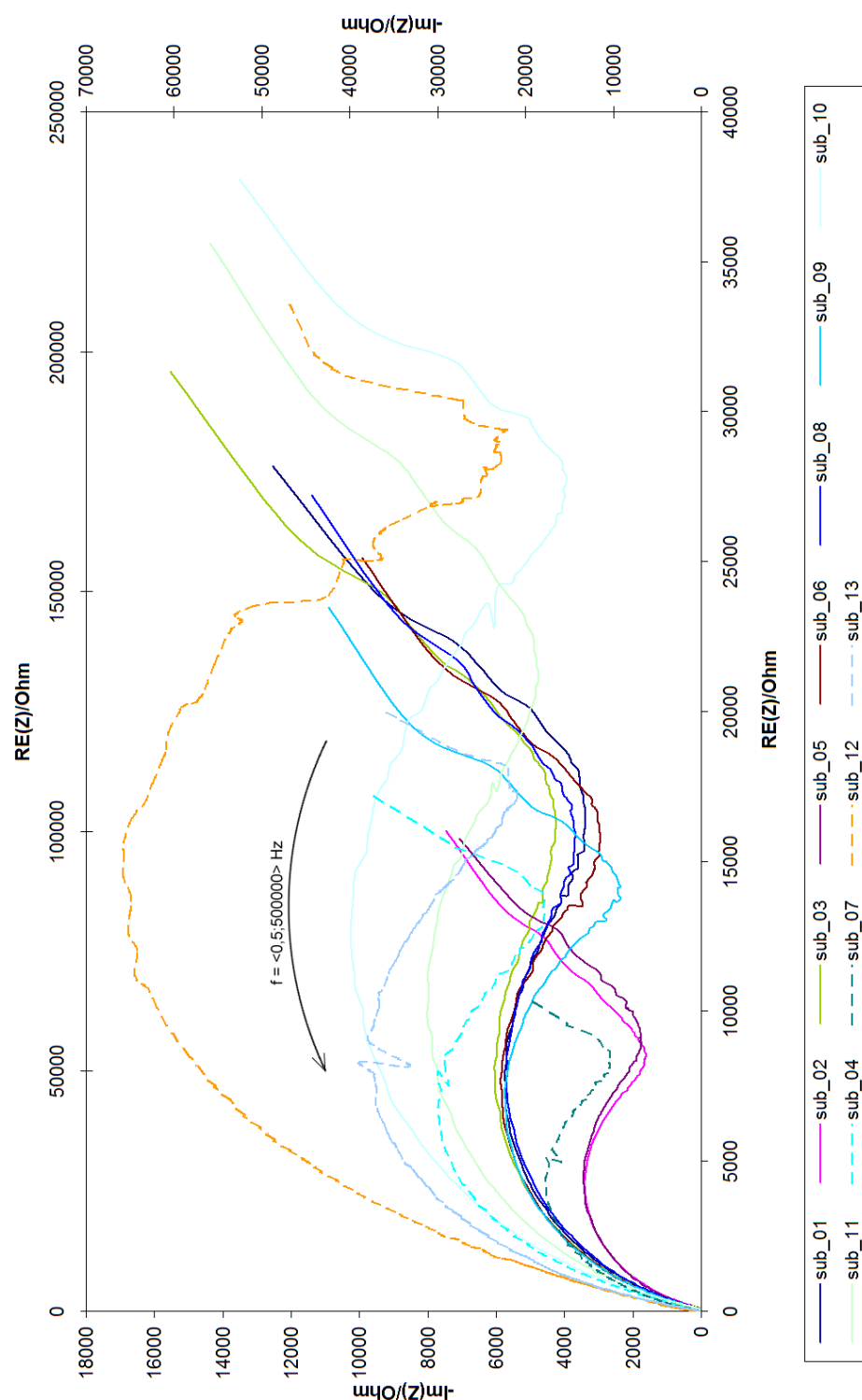
CPE – Constant Phase Element – Prvek s konstantní fází
 DENS – Dynamic ElectroNeuroStimulation – Dynamická elektroneurostimulace
 DPS – Deska Plošných Spojů
 FR4 – Flame Retardant 4 – Druh základního materiálu pro plošné spoje
 ISO – International Organization for Standardization – Mezinárodní organizace pro standardizaci
 PEIS – Potentio Electrochemical Impedance Spectroscopy – Spektroskopie impedance elektrochemického potenciálu
 SCENAR – Self Controlled Energo Neuro Adaptive Regulator – Samořízený adaptibilní neuroregulátor
 SMD – Surface Mount Device – Zařízení pro povrchovou montáž

a	[–]	pomocná proměnná pro výpočet CPE
α	[–]	koefficient impedance CPE
b	[–]	pomocná proměnná pro výpočet CPE
C	[F]	kapacita
D_p	[Ω]	požadovaný modul impedance CPE
D_v	[Ω]	vypočítaný modul impedance CPE
E	[V]	elektrický potenciál
f	[Hz]	frekvence
f_f	[Hz]	počáteční frekvence měření spektrometru
f_i	[Hz]	konečná frekvence měření spektrometru
G_{var}	[S]	nezávislá konduktance
j	[–]	imaginární jednotka
κ	[–]	koefficient násobení paralelní rezistivity
m	[–]	počet větví CPE
N_a	[–]	počet pokusů měření spektrometru
N_d	[–]	počet kroků skenování spektrometru
p_w	[–]	podíl z periody – čekací doba před změnou frekvence
Q	[F.s $^{\alpha-1}$]	parametr CPE
r	[–]	Pearsonův koefficient korelační analýzy
R	[Ω]	rezistivita
τ_z	[s]	relaxační doba obvodu
U	[V]	elektrické napětí
\mathbf{Y}	[S]	komplexní admitance
\mathbf{Z}	[Ω]	komplexní impedance
ω	[s $^{-1}$]	úhlový kmitočet
$\Delta\phi$	[Hz]	kmitočtový zdvih

SEZNAM PŘÍLOH

A Graf naměřených impedancí kůže.	64
B Popis souborů na médiu	65

A GRAF NAMĚŘENÝCH IMPEDANCÍ KŮŽE.



Obrázek A.1: Průběhy impedancí třinácti subjektů.

B POPIS SOUBORŮ NA MÉDIU

Na přiloženém médiu jsou (kromě elektronické verze práce) umístěny zdrojové soubory návrhu obvodu přípravku a naměřená data. Tato příloha slouží ke snadné orientaci v nich.

V adresáři **data** se nachází tyto složky a soubory:

- **aplikace.xlsx** – naměřená data a grafy získané měřením parametrů přístroje DiaDENS-PC.
- **dynamicky_dip.xls** – soubor tabulkového procesoru obsahující naměřená data včetně simulovaných a výsledných náhradních obvodů pro dynamický model. Pojímá i listy zobrazující grafy obsažené v této práci.
- **pripravek.xlsx** – naměřená data a grafy získané testováním hotového přípravku.
- **staticky_dip.xls** – soubor obsahující naměřená data pro získání statického modelu včetně výpočtů ekvivalentních obvodů a grafů.

V adresáři **design** se nachází tyto složky a soubory:

- **deska.png** – pozitivní předloha pro zhotovení DPS.
- **schema.brd** – předloha DPS pro program Eagle.
- **schema.sch** – návrh obvodu pro program Eagle.